

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ARTUR LOVRO

**PANORAMA SOBRE DEFEITOS E FALHAS FREQUENTES EM PÁS
EÓLICAS**

SÃO PAULO

2016

Catalogação-na-publicação

LOVRO, ARTUR

PANORAMA SOBRE DEFEITOS E FALHAS FREQUENTES EM PÁS
EÓLICAS / A. LOVRO -- São Paulo, 2016.
118 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída
e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia Eólica 2.Pás Eólicas 3.Falhas e Defeitos 4.Prevenção
I.Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, PECE – Programa de
Educação Continuada em Engenharia II.t.

ARTUR LOVRO

PANORAMA SOBRE DEFEITOS E FALHAS FREQUENTES EM PÁS EÓLICAS



Monografia apresentada ao PECE - Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a conclusão do curso de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Orientador:
Prof. Dr. Demétrio Cornilius Zachariadis

SÃO PAULO

2016

AGRADECIMENTOS

À minha família, que sempre me apoiou nas decisões importantes e na realização deste curso.

Ao Prof. e Orientador Dr. Demétrio Cornilius Zachariades, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela orientação e estímulo no desenvolvimento do tema escolhido.

Aos colegas e profissionais dos segmentos relacionados ao tema escolhido, sem o que não teria sido possível realiza-lo: *Thiago Viana e Daniel Costa Mello*, da *AERIS Service* pelo suporte nas informações prestadas. *Marcelo A. de Carvalho*, da *ITW Wind Group*, pela literatura compartilhada, bem como dicas relacionadas aos materiais compósitos e técnicas construtivas das pás eólicas. *Sandro Yamamoto*, Diretor Técnico da Abeeólica – Associação Brasileira de Energia Eólica, pela atenção durante a Brasil Wind Power 2016 realizado entre 30 agosto e 01 de setembro de 2016 no Rio de Janeiro.

Aos membros da empresa Dinamarquesa *Bladena – Blade Enabler*, Sr. *Find Mølholt Jensen*, PhD , Chief Technical Officer, *Andrei Buliga*, Project Manager e *Margrethe Werk*, FEM Engineer por compartilhar valiosa e atualizada literatura sobre o tema, bem como boa parte das fotos utilizadas neste trabalho.

Anthony Rowell, da *ISL Wind*, por compartilhar seu conhecimento técnico e prático na área de manutenção de aerogeradores, o que em muito contribuiu para enriquecer este trabalho.

RESUMO

Questões voltadas para a segurança energética, desenvolvimento sustentável e proteção ambiental têm sido tema de grandes discussões internacionais nos últimos anos. Países desenvolvidos em todo o mundo investem atualmente grandes somas na pesquisa e desenvolvimento de sistemas de geração através de fontes renováveis, principalmente para mitigar o impacto causado pela queima de combustíveis fósseis e emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, a participação da energia eólica na matriz energética nacional tem aumentado de forma robusta, consolidando-se como importante fonte na distribuição da matriz elétrica nacional, e por isso mesmo, de fundamental importância no cenário tecnológico e estratégico brasileiro. No entanto, pelo fato de nossos parques eólicos instalados serem ainda relativamente novos, muitos dos problemas derivados da operação destes aerogeradores são pouco conhecidos e consequentemente, não amplamente difundidos e discutidos. Como a cadeia produtiva associada é bastante complexa, incluindo-se fabricantes de matérias primas e insumos diversos, de componentes chave para a performance dos aerogeradores, tais como rotores e pás, principalmente, é de fundamental importância examinarmos mais detalhadamente essa questão. Se considerarmos a quantidade de 8000 turbinas em operação nas suas mais variadas potências, temos hoje cerca de 24.000 pás em operação nos parques brasileiros, nas mais diversas condições climáticas de vento e de senioridade, distribuídas principalmente nas regiões Nordeste e Sul do Brasil. Desta forma, podemos inferir que a ocorrência de falhas poderá aumentar consideravelmente no futuro, também pelo fator de capacidade de nossos ventos, muito maior quando comparado aos fatores europeus e americanos. A variedade de problemas ocorridos em mercados mais maduros do que o brasileiro, em condições de adversidade similares ou distintas, nos levam a examinar o tema com maior profundidade. Desta forma, é importante conhecermos os fundamentos, entender os danos, defeitos e as falhas nas pás, examinando suas causas, que podem comprometer o bom desempenho destes custosos equipamentos. Atuar de forma corretiva nem sempre é a melhor solução, o que pode trazer perdas aos envolvidos nessa operação.

Este trabalho tem por objetivo examinar e classificar os principais tipos de defeitos e falhas que potencialmente podem ocorrer nas pás de turbinas eólicas instaladas no mercado nacional, bem como identificar algumas das possíveis alternativas de

Serviços existentes, de forma a ajudar a mitigar a ocorrência de problemas e seus consequentes efeitos sobre os aerogeradores instalados no Brasil.

Palavras – chave: energia eólica, aerogeradores, pás eólicas, falhas, prevenção.

ABSTRACT

Questions focusing on the efficient supply of energy, aligned with sustainable development and environmental protection have been the subject matter of major international discussions in recent years. Developed countries worldwide are currently investing large sums of money in research and development of renewable sources for energy generation systems, mainly in order to mitigate the adverse impact caused by fossil fuels and greenhouse gas emissions. In this context, wind energy is steadily growing within the Brazilian domestic energy matrix, consolidating its position as the third largest renewable source in the distribution of the national electrical sources. However, in view of the fact that our wind parks are relatively newly installed, many potential problems are still unknown, and hence, not fully understood. Therefore, to date, blade damages and failures are neither completely understood, nor thoroughly discussed. As the supply chain involved in the wind turbine market is quite complex, encompassing raw materials manufacturers, key components manufacturers such as rotors and blades, OEMs and Service Providers, among others, it is of the upmost importance to accurately examine the details of this process. Considering that Brazil has currently 8000 wind turbines installed in all its different range of powers and approximately 24.000 thousand blades in operation in all its established parks, under various weather & wind conditions and seniority levels, mainly distributed throughout the Northeast and Southern regions of Brazil with much higher capacity levels when compared to other markets, we can infer that the occurrence of failures can considerably increase in the near future. The variety of problems existing in more mature markets, when compared to Brazil, either in similar or different conditions of adversity, should suffice to lead us to examine this matter in detail. Thus, it is important to understand the basics of wind turbine blades mechanical behavior, its failure principles, as well as the likelihood of blade damage occurrences that can perhaps compromise the proper performance of such expensive machines. Acting correctively when failure occurs is not always the best applicable solution, to the extent that considerable losses affecting those involved in this complex industry and supply chain can cause severe consequences.

This study aims to examine the main types of damage, defects and failures that can potentially occur in wind turbine blades installed in the Brazilian domestic market,

Discussing alternatives for preventive and predictive practices, in order to minimize the occurrence of potential problems and critical effects on our wind turbine installed parks.

Key - words: wind power, wind turbines, wind blades, fault, and prevention.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Moinhos de Vento e Aerogeradores primitivos	20
Figura 1.2: Charles Bruch e o 1.o Cata-vento destinado à geração de energia elétrica	21
Figura 1.3: Poul La Cour e o 1.o aerogerador de pás em 1891	22
Figura 1.4: Dr. Alfred Betz e seu experimento para otimização da geometria das pás 1932	23
Figura 1.5: Evolução da potência dos aerogeradores ao longo do tempo - Crescimento dos aerogeradores – diâmetro do rotor, altura de torre e potência nominal.....	24
Figura 1.6: Classificação de Aerogeradores por Fabricantes.....	24
Figura 1.7: Evolução da capacidade instalada de parques eólicos no Brasil	25
Figura 2.1: Protótipo da Turbina V-164 de 8 MW	28
Figura 2.2: Análise comparativa do diâmetro de rotor da turbina offshore V-164.....	29
Figura 2.3: Vista interna esquematizando componentes de uma turbina	29
Figura 2.4: Componentes básicos de aerogeradores de eixo vertical em diferentes configurações	30
Figura 2.5: Turbina eólica com gerador síncrono de imãs permanentes	31
Figura 3.1: Fluxos laminar e turbulentos	32
Figura 3.2: Esquema ilustrativo da Equação de Bernoulli	33
Figura 3.3: Esquema ilustrativo da Equação de Bernoulli com $\Delta h = 0$	33
Figura 3.4: Esquema do Efeito Venturi.....	34
Figura 3.5: O conceito da energia extraída de um fluxo tubular	35
Figura 3.6: Razão da velocidade em função da área varrida	37
Figura 3.7: Coeficiente de potência em função da razão das velocidades.....	37
Figura 3.8: Vista esquemática do efeito de estolamento em uma pá	39
Figura 3.9: Rotação das pás para “Pitch Control”	40
Figura 3.10: Vista esquemática do controle de stall e pitch em uma pá eólica	40
Figura 3.11: Controle de “pitch” e “stall”	41
Figura 3.12: Esteira de turbulência após controle de pitch.....	41
Figura 3.13: Anatomia de uma pá	42
Figura 3.14: Corte Transversal de uma pá e seus elementos construtivos	43
Figura 3.15: Geometria e esforços atuantes em uma pá eólica	44
Figura 3.16: Fig. Esquemática do Princípio da Lei de Hooke.....	45

Figura 3.17: Tensões axiais e de alongamento nas fibras	45
Figura 3.18: Tensões de cisalhamento atuantes nas fibras de uma pá	45
Figura 3.19: Cargas Axial e de Flexão	46
Figura 3.20: Tensões de Cisalhamento superficial.....	46
Figura 3.21: Visão esquemática da velocidade de ponta ou “tip speed”	47
Figura 3.22: Detalhes da interação aerodinâmica entre torre e rotor são vistos à direita da figura	49
Figura 4.1: Deformação elástica.....	50
Figura 4.2: Efeito e Comportamento da Fadiga ao Longo do Tempo.....	51
Figura 4.3: Estrutura dos Compósitos	52
Figura 4.4: Alongamento estrutural das Fibras-Compósitos	53
Figura 4.5: Vigas estruturais nas pás podem assumir formas cônicas ou torcidas	54
Figura 4.6: Visão esquemática do comportamento torcional em uma viga estrutural de uma pá	54
Figura 4.7: Vigas estruturais nas pás podem assumir as formas cônicas ou torcionadas	55
Figura 4.8: Modos de cargas de Flexão	55
Figura 4.9: Modos de carga de tração e compressão	56
Figura 4.10: Movimento e esforços torcionais de uma pá	56
Figura 4.11: Vibração SEM amortecimento.....	58
Figura 4.12: Vibração COM amortecimento	58
Figura 4.13: Vibração com aumento na rigidez da pá	59
Figura 4.14: Esforços e Solicitações em uma Pá em Operação	60
Figura 4.15: Esforços estruturais complexos atingem as pás eólicas quando em operação	61
Figura 4.16: Forças Aerodinâmicas que atingem as pás quando em operação.....	62
Figura 4.17: Fibras diversas aplicadas às pás	63
Figura 4.18: Espumas estruturais e de enchimento	64
Figura 4.19: Desmoldante Loctite Frekote 770 – NC	65
Figura 4.20: Estrutura Molecular de um Polímero Termorrígido.....	65
Figura 4.21: Fabricantes de Pás estabelecidos no Brasil e local de suas plantas	67
Figura 5.1: Ilustração de preparação de moldes para pás	75
Figura 5.2: Ilustração esquemática de um molde	76
Figura 5.3: Fechamento de um molde de infusão	76

Figura 5.4: Ilustração esquemática de um molde de infusão	77
Figura 5.5: Operação de acabamento em pás	77
Figura 5.6: Centro de Testes de pás eólicas em Charlestown, Massachusetts	79
Figura 5.7: Testes de pás eólicas.....	79
Figura 5.8: Testes em Pás Eólicas – cortesia LM Glasfiber	80
Figura 5.9: Ilustrações de dispositivos e bancadas de testes de verificação de desenho e processo DV (Design Verification Tests) e PV (Process Verification Tests)	81
Figura 5.10: Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada – Energ. Eólica	82
Figura 5.11: Nomenclatura dos elementos da pá.....	84
Figura 5.12: Foto caracterizando tecido seco.....	86
Figura 5.13: Foto caracterizando rachaduras e trincas em uma pá	86
Figura 5.14: Foto caracterizando Reentrância ou Sulco em uma pá.....	86
Figura 5.15: Deslocamento do material de núcleo após o processo de infusão	87
Figura 5.16: Procedimento “Cirúrgico” realizado a faca em uma pá, mostra um corte transversal nas camadas de fibra de vidro, o que fatalmente poderá levar a ocorrência de trincas transversais nesta área da pá eólica quando posta em operação.....	87
Figura 5.17: Foto caracterizando uma Delaminação na pá	88
Figura 5.18: Foto caracterizando pequenas Bolhas na pá	88
Figura 5.19: Foto caracterizando “Pontos Brancos” na pá	89
Figura 5.20: Foto caracterizando falta de compactação no laminado da pá	89
Figura 5.21: Foto caracterizando tecido dobrado no fechamento	90
Figura 5.22: Foto caracterizando falta de colagem e ponta quebrada em pá	90
Figura 5.23: Fotos caracterizando falha de massa no processo de colagem.....	90
Figura 5.24: Fotos caracterizando falha de massa no processo de colagem.....	91
Figura 5.25: Foto caracterizando ferrugem e desalinhamento no molde	91
Figura 5.26: Foto caracterizando desalinhamento no molde.....	91
Figura 5.27: Foto caracterizando presença de vazios	92
Figura 5.28: Foto caracterizando a ruptura no laminado.....	92
Figura 5.29: Foto caracterizando a ruptura no laminado.....	92
Figura 5.30: Foto em corte de um flange de pá de 55m de comprimento	93
Figura 5.31: Ruga.....	93
Figura 5.32: Descolamento da longarina dentro de uma pá.....	94

Figura 5.33: Falta de material adesivo entre a caixa estrutural e as cascas de formato aerodinâmico.....	95
Figura 5.34: Mostra retrabalho em estrutura interna de uma pá	95
Figura 5.35: Retrabalhos diversos em estrutura interna de pás	96
Figura 5.36: Leading edge tape erosion.....	97
Figura 5.37: Leading edge tip erosion	98
Figura 5.38: Leading edge erosion.....	98
Figura 5.39: LE panel eroded	99
Figura 5.40: Erosão nos bordos de ataque	99
Figura 5.41: Caracterização de erosão nos bordos de ataque.....	100
Figura 5.42: Descascamento de laminado (Epoxi).....	100
Figura 5.43: Bordo de ataque desgastado pela erosão.....	101
Figura 5.44: Descarga Elética	102
Figura 5.45: Ilustração de descargas elétricas entre Trópico e o Equador	102
Figura 5.46: Bladetip stroke by lightning	102
Figura 5.47: Damaged blade tip due to lightning	103
Figura 5.48: Blade tip damaged by lightning	103
Figura 5.49: Pontas de Pás diversas que sofreram descargas elétricas.....	104
Figura 5.50: Fotos caracterizando trincas longitudinais	105
Figura 5.51: Trinca longitudinal nos bordos de fuga.....	106
Figura 5.52: Trincas transversais ao sentido de laminacão	106
Figura 5.53: Trincas observadas devido ao processo de delaminação.....	107
Figura 5.54: Delaminação ao longo do bordo de fuga de uma pá de um aerogerador	107
Figura 5.55: Outras falhas de delaminação nos bordos de fuga	108
Figura 5.56: Pás defeituosas apresentando ruptura estrutural.....	108
Figura 5.57: Pá apresentando rompimento estrutural	109
Figura 5.58: Pá apresentando rompimento estrutural	109
Figura 5.59: Rompimento de pás sujeitas a intempéries no campo	109
Figura 5.60: Rebarbas de colagem soltas na parte interna.....	110
Figura 5.61: a, b, c respectivamente, mostra consequências do impacto físico de objetos estranhos, tais como aves e insetos por exemplo.	110
Figura 5.62: Insetos podem impactar as pás e causar rugosidade que prejudica o desempenho.....	111

Figura 5.63: Danos causados durante o transporte	111
Figura 6.1: Inspeção visual para constatação de dano feita através de acesso por corda	113
Figura 6.2: Plataforma de acesso manual	113
Figura 6.3: Imagem de testes não destrutivos – NDT	114
Figura 6.4: Plataformas Elevatórias com unidade de serviço ao topo – Cortesia ISL Wind	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Tipos de cargas atuantes nos aerogeradores	59
Tabela 5.1: O Mercado Brasileiro – Vida útil esperada em função do Fc.....	69
Tabela 5.2: Dispersão na altura das torres instaladas no Brasil.....	73
Tabela 5.3: Tipos, altura das torres e comprimento das pás dos aerogeradores nacionais	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1: O Fator de Capacidade acelera a vida útil dos aerogeradores	68
Gráfico 5.2: Crescimento estimado para o mercado de Operação & Manutenção no Brasil 2013-2024	72
Gráfico 5.3: Idade e potência acumulada instalada dos aerogeradores existentes nos parques nacionais	74

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO	25
2. TURBINAS EÓLICAS.....	28
3. TEORIA DA ENERGIA EÓLICA APLICADA ÀS PÁS	32
3.1. AERODINÂMICA DE UM AEROGERADOR.....	32
3.2. ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DOS VENTOS: O COEFICIENTE DE POTÊNCIA E O LIMITE DE BETZ.....	34
3.3. CONVERSÃO DE ENERGIA, AERODINÂMICA E ESFORÇOS NAS PÁS.	38
3.3.1. DESENHO DAS PÁS	38
3.3.2. VELOCIDADE RELATIVA NOS ELEMENTOS DA PÁ E SISTEMAS DE CONTROLE PARA LIMITAÇÃO DE POTÊNCIA	38
3.3.3. ANATOMIA DE UMA PÁ	42
3.3.4. GEOMETRIA E FORÇAS ATUANTES NA PÁ	43
3.3.5. TENSÕES E DEFORMAÇÕES. ESTRUTURAIS	44
4. CARGAS ESTRUTURAIS E MATERIAIS COMPÓSITOS	50
4.1. A IMPORTÂNCIA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO NOS MATERIAIS APLICADOS ÀS PÁS EÓLICAS.....	50
4.2. COMPÓSITOS	52
4.3. VIGAS ESTRUTURAIS	53
4.4. FLEXÃO E TORÇÃO	55
4.5. VIBRAÇÕES	57
4.6. FADIGA OPERACIONAL NAS PÁS EÓLICAS	60
4.7. MATERIAIS DIVERSOS	62
5. PANORAMA GERAL SOBRE OS TIPOS DE DANOS, DEFEITOS E FALHAS ENCONTRADOS NAS PÁS DE AEROGERADORES	68
5.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PÁS	75
5.2. NOMENCLATURA DOS DANOS.....	83

5.3. DEFEITOS DE FABRICAÇÃO	85
5.4. DEFEITOS DE CAMPO	97
6. INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DE AEROGERADORES	112
6.1. INSPEÇÃO DE MANUTENÇÃO	112
6.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA	113
6.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA	115
7. CONCLUSÃO	116

1. INTRODUÇÃO

A energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, através do emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, cuja finalidade é a geração de eletricidade, ou de cata-ventos e moinhos, estes voltados para realização de trabalhos mecânicos como por exemplo, o bombeamento d'água.

Os Cata-ventos são utilizados há pelo menos 3.000 anos para irrigação e moagem de grãos, mas a utilização da energia do vento para locomoção na navegação é ainda mais antiga, com cerca de 7.000 anos de aplicação. A origem do cata-vento não está claramente definida na história. Contudo, se considerarmos as leis e códigos existentes em culturas do passado, acredita-se que tenha se originado na antiga Babilônia, que corresponderia ao atual território do Iraque. Os Chineses também usaram cata-ventos de eixo vertical para bombear água durante a Dinastia Ming (1368 -1644). Em comparação com o cata-vento pérsico e grego, a construção chinesa com palhetas giratórias teve a vantagem de aproveitar o vento independente da direção. Os cata-ventos com eixo horizontal foram introduzidos na Europa durante o século XII.

Até a invenção do motor a combustão, as rodas de água e os cata-ventos foram as únicas fontes de energia mecânica com potências entre 5 e 10HP. Mesmo com estes potenciais relativamente baixos, desempenharam um papel fundamental no desenvolvimento do continente europeu até o século XIX, sendo utilizados principalmente para moer grãos, bombear água, extraír óleo, serrar madeira, entre outras funções associadas a este equipamento.

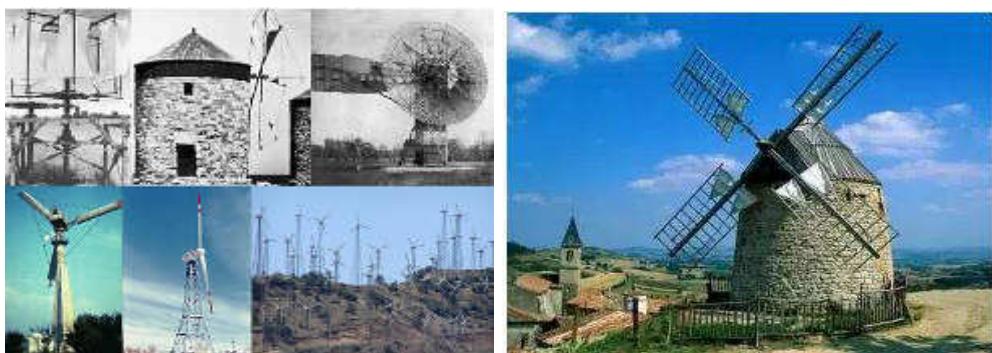


Figura 1.1: Moinhos de Vento e Aerogeradores primitivos

Fonte: Wind Energy Magazine

O início da adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica teve início ainda no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Bruch, um industrial que trabalhava para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado à geração de energia elétrica. Tratava-se de um cata-vento que fornecia 12kW em corrente contínua para carregamento de baterias, principalmente, as quais eram destinadas para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (SCIENTIFIC AMERICAN JOURNAL – RIGHTER, 1991 & SHEFHERD, 1994).

Bruch utilizou-se da configuração de um moinho para o seu invento. A roda principal, conforme mostra a fig. 1.4 abaixo, com suas 144 pás, tinha 17m de diâmetro em uma torre de 18m de altura. Todo o sistema era sustentado por um tubo metálico central de 36cm que possibilitava o giro de todo a máquina, acompanhando assim o vento predominante.

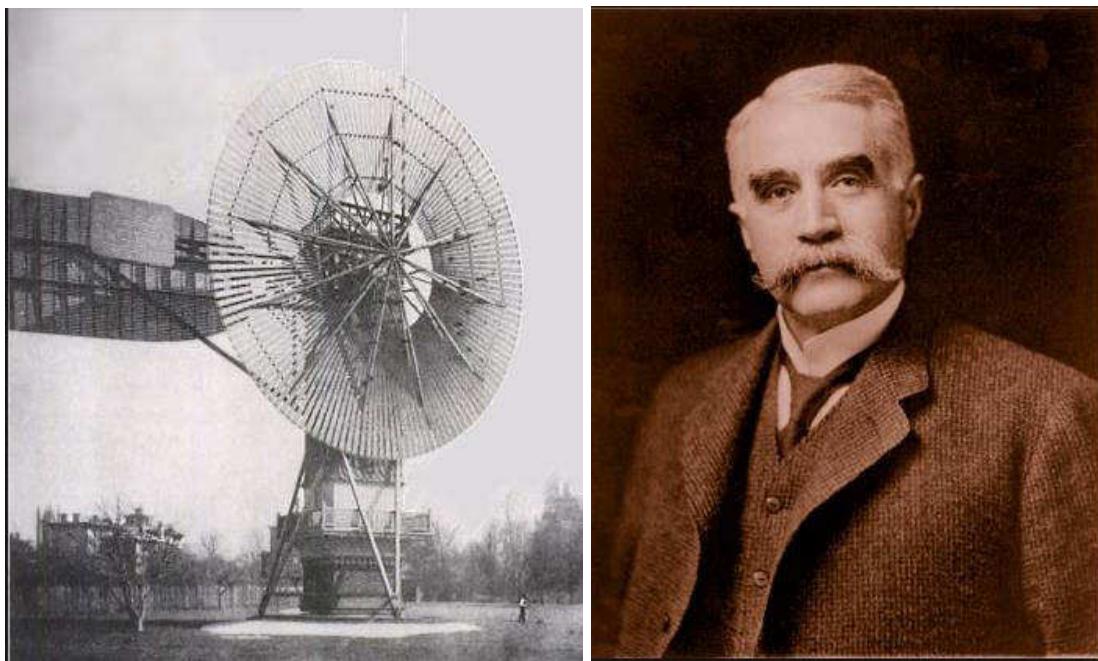


Figura 1.2: Charles Bruch e o 1.º Cata-vento destinado à geração de energia elétrica

Fonte: MANWELL, GOWAN, ROGERS; 2004

Esse sistema esteve em operação por 20 anos, sendo desativado em 1908. Sem dúvida, o cata-vento de Bruch foi um marco na utilização dos cata-ventos para a geração de energia elétrica.

O invento de Bruch apresentava (03) três importantes inovações para o desenvolvimento do uso da energia eólica para geração de energia elétrica.

- (1) A altura utilizada pelo invento estava dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para beneficiamento de grãos e bombeamento d'água.
- (2) Introduziu-se então um mecanismo de grande fator de multiplicação na rotação das pás (50:1) que funcionava em dois estágios, possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo, cujo funcionamento girava em 500rpm.
- (3) Esse invento foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica.

Contudo, o desenvolvimento de aerogeradores com a finalidade específica de gerar energia elétrica se iniciou no fim do século XIX, com a pesquisa do professor Dinamarquês, *Poul La Cour*, em *Askov*, na Dinamarca. Nessa época, a eletrificação da sociedade urbana moderna estava em seus primórdios. *La Cour*, desenvolveu o primeiro aerogerador em 1891, e já durante a Primeira Guerra Mundial (1914-1918), 250 unidades foram postas em funcionamento.



Figura 1.3: Poul La Cour e o 1.o aerogerador de pás em 1891

Fonte: <http://www.folkecenter.net/gb/rd/wind-energy/48007/poullacour/>

Depois da Primeira Guerra, baseando-se nas novas tecnologias de hélices para aviões civis e militares, Alfred Betz, físico alemão nascido em *Schweinfurt* na Alemanha em 25 de dezembro de 1885, desenvolveu o princípio do disco-atuador e

também um método de otimização da geometria das pás, a fim de aumentar a eficiência dos aerogeradores.

(Alfred Betz se tornou PhD em 1919 com seu trabalho 'ship propellers with minimum loss of energy'. E em 1920 complementou seu trabalho com o título "Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren")

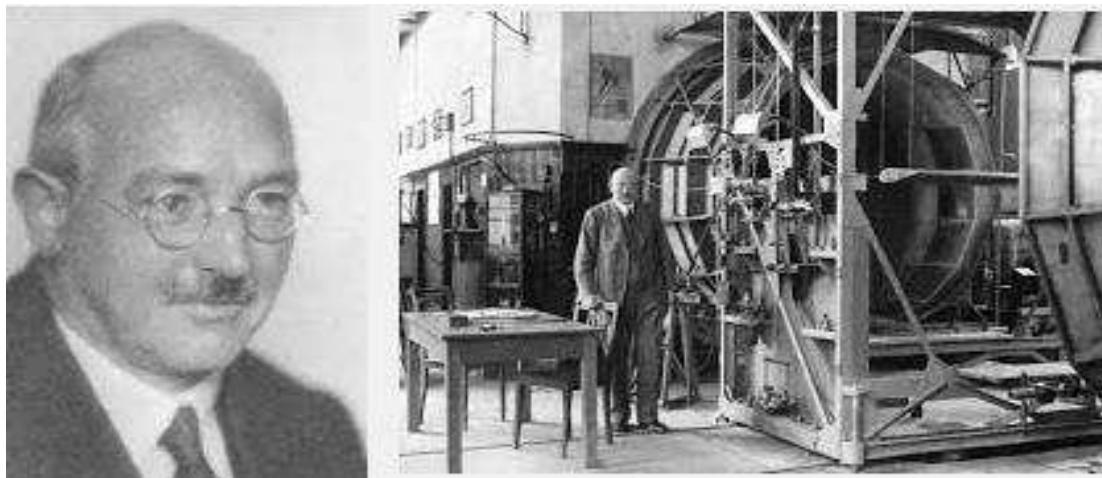


Figura 1.4: Dr. Alfred Betz e seu experimento para otimização da geometria das pás 1932

Fonte: MANWELL, GOWAN, ROGERS; 2004

Após esse marco na ciência, vários tipos de aerogeradores foram desenvolvidos em países como Dinamarca, França, Alemanha, Inglaterra, Estados Unidos e Rússia. Mas, com o início da Segunda Guerra Mundial em 1939, o desenvolvimento dessa tecnologia na Europa se estagnou momentaneamente. Além disso, devido ao descobrimento de muitos novos poços de petróleo, principalmente nos Estados Unidos e Oriente Médio, e com a ampla disponibilidade e consequente queda no preço dessa fonte energética, ocorreu que os aerogeradores se tornaram então desinteressantes. Com a chegada das crises do petróleo no Oriente na década de 70, iniciou-se uma nova era no desenvolvimento dos aerogeradores de grande porte, estes agora com diâmetros de rotor bastante maiores, entre 55 e 100m, de forma a otimizar a captura do vento e otimizar o rendimento das máquinas. O resultado inicial mostrou falhas nos projetos dos aerogeradores de grande porte na Alemanha, Estados Unidos e Suécia, cujas construções foram tecnicamente problemáticas e economicamente inviáveis. Paralelamente, porém, nessa mesma época, pequenas empresas agrícolas situadas na Dinamarca, (entre elas *Vestas*, *Bonus*, *Nordtank*, entre outras), já conseguiam desenvolver aerogeradores com diâmetros de rotor entre

12 e 15m e com potências entre 33 e 75kW, porém com sucesso técnico e econômico-financeiro, aproveitando-se dos novos materiais tais como compósitos de fibra e polímeros. Após vencidas essas barreiras, a tecnologia e os materiais compósitos se desenvolveram consistente e gradativamente até os tempos atuais, aonde podemos atualmente encontrar uma grande proliferação de máquinas e potências conforme resumidamente mostra a figuras abaixo.

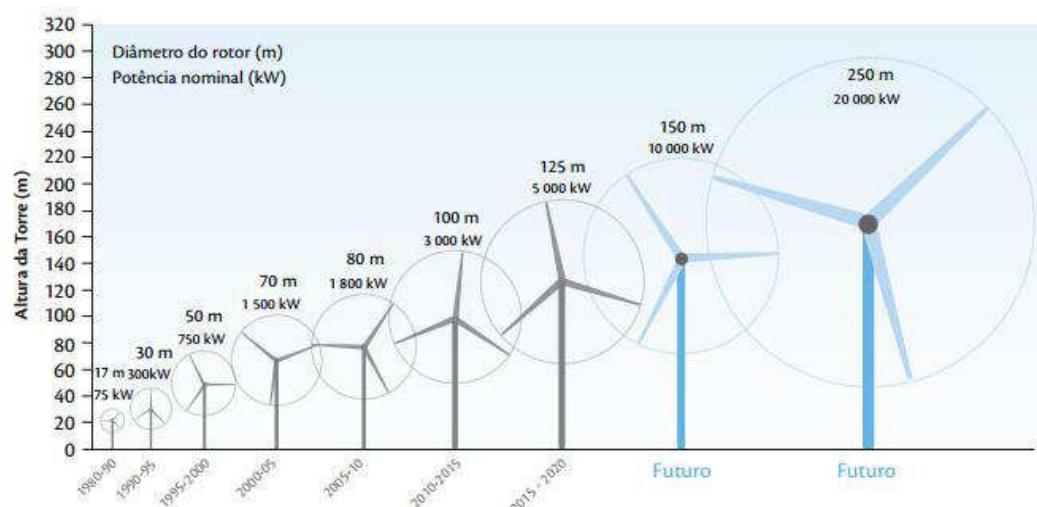


Figura 1.5: Evolução da potência dos aerogeradores ao longo do tempo - Crescimento dos aerogeradores – diâmetro do rotor, altura de torre e potência nominal.

Fonte: Programa Demonstrativo para Inovação em Cadeia Produtiva Selecionada – adaptado do IEA, 2013



Figura 1.6: Classificação de Aerogeradores por Fabricantes

Fonte: Gardner P, Garrad A, Hansen LF, Jamieson P, Morgan C, Murray F, et al. Wind energy the facts e part I e technology. Garrad Hassan and Partners-UK; 2009.

1.1. A ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO

O Brasil é considerado um mercado muito promissor para investimentos em energia dos ventos, em função do enorme potencial eólico inexplorado (fala-se em até 500 GW de potencial – fonte *ABEEÓLICA – 2016*), das crescentes necessidades energéticas e da competitividade dos projetos eólicos, já demonstrada nos leilões de energia promovidos pela *ANEEL* – Agencia Nacional de Energia Elétrica.

Segundo dados atualizados do Ministério de Minas e Energia, atualmente, são cerca de 10 mil MW de potência instalada a partir da geração do vento, mais que suficiente para atender a dois estados como o Rio Grande do Sul no País, e a expectativa é que esse patamar chegue a aproximadamente 25 mil MW, em 2025. Segundo dados publicados pela Associação Brasileira de Energia Eólica, a capacidade instalada de energia eólica ao final de novembro de 2016 foi de 10,60 GW, em 424 parques eólicos. Em construção e contratados, existiam outros 7,35 GW.

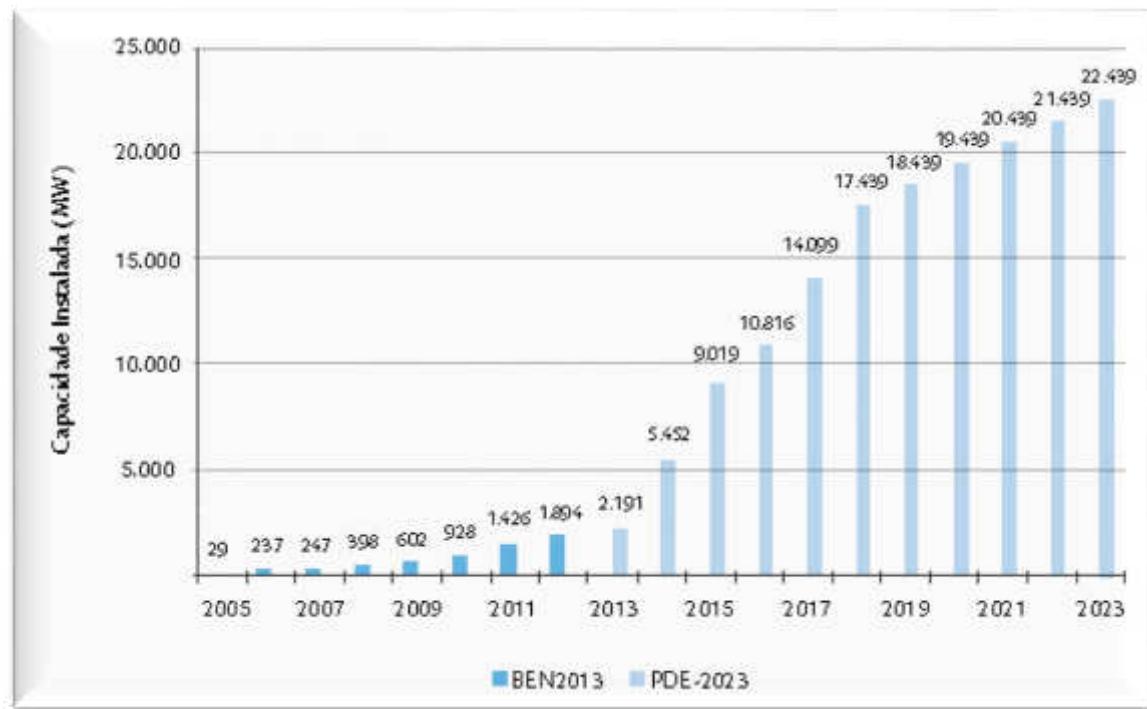


Figura 1.7: Evolução da capacidade instalada de parques eólicos no Brasil

Fonte: BEN 2013 e PDE 2023

As regiões Nordeste e Sul, principalmente, são bastante favorecidas pela constância e qualidade dos ventos que lá sopram, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e por uma variabilidade de apenas 5%, o que proporciona maior previsibilidade ao volume de energia a ser produzido,

bem como excelentes fatores de carga. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar usinas eólicas em sistema complementar com usinas hidrelétricas e ou solares, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas.

Atualmente, o setor eólico brasileiro vem resistindo aos efeitos da crise econômica e financeira pelo qual passa o país, mas não deixou de ser afetado por ela. Em um ano como o de 2015, aonde o PIB brasileiro retraiu cerca de 3,8%, o segmento conseguiu manter o investimento de cerca de R\$ 16,4 bilhões, mostrando pujança. Contudo, as consequências da retração chegam na forma de demanda encolhida e incerta, o que leva a um teste de sobrevivência para a cadeia produtiva do setor, especialmente para fabricantes e demais envolvidos nesta robusta cadeia de valor, aonde já ocorre movimento de fusões e aquisições entre concorrentes, bem como de verticalização produtiva.

A capacidade média anual contratada em leilões eólicos é de 2.167 MW, mas, segundo fontes do setor, o volume mínimo de pedidos para se manter a sustentabilidade do segmento e da cadeia produtiva deve ser de 500 MW ano por fabricante de aerogerador instalado no país. Considerando que temos 07 (sete) fabricantes produzindo aerogeradores no país, a demanda para manter essas montadoras ocupadas deveria ser, de no mínimo, 3,5 GW por ano. No entanto, pelo que mostra a taxa de ocupação atual de OEMs e fornecedores, o mercado brasileiro de projetos de energia eólica atual é insuficiente para a capacidade instalada total das sete fabricantes de turbinas localizadas no país. Considerando-se a capacidade instalada de todos os fabricantes operando no país, existe hoje uma ociosidade de quase 75%. O mais recente plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), em análise no MME – Ministério das Minas e Energia, indica contratação adicional de 6,6 GW entre 2016 e 2022, ou seja, um ritmo anual de 940 MW aproximadamente, este muito aquém do número de equilíbrio anteriormente mencionado. O novo PDE – Plano de Desenvolvimento Econômico, prevê que em 2025 estejam em operação 25.100 MW da fonte eólica, dos quais 18.500 MW já estão contratados, já considerada a demanda contratada pelo mercado livre.

O cenário atual no mundo por sua vez, mostra que o crescimento do setor na China está sufocado por acesso insuficiente aos grids de conexão, enquanto um cenário de desaceleração parece ter retornado aos EUA, como resultado de

incertezas sobre a expiração de programas de incentivo. Na Alemanha e na Itália, cortes de tarifa e desafios relacionados aos grids de conexão de energia têm reduzido a atratividade no curto prazo, enquanto o fim de um importante benefício fiscal na Índia deve prejudicar o crescimento do setor eólico em 2016. Por outro lado, diversos países, incluindo México, Chile, e mais recentemente a Argentina, anunciaram novos objetivos em geração de energia limpa ou reafirmaram o apoio do governo por meio de incentivo. Apesar disso, a energia eólica instalada no mundo crescerá de modo significativo nas próximas décadas e será parte importante do portfólio de energia renovável de muitos países.

A recente evolução dessa tecnologia possibilitou o aumento da potência das turbinas com torres em altura crescente, vindo desde os 17m e 75 KW em 1990 para os atuais 8000 KW e 180m em 2016, e também com pás proporcionalmente mais longas, chegando aos atuais cerca de 88.4 m de comprimento. (*Adwen's*)

2. TURBINAS EÓLICAS

Turbinas Eólicas ou Aerogeradores são máquinas que retiram energia do vento por efeitos aerodinâmicos atuando nos perfis de suas pás. São classificadas em turbinas de eixo vertical ou horizontal, estas últimas as quais focamos neste trabalho, e geram energia através de um gerador elétrico conectado ao seu eixo horizontal. Os aerogeradores possuem três componentes básicos, o rotor com as pás, a nacelle e a torre. Na nacelle ficam os principais componentes tais como o gerador elétrico, caixa multiplicadora de velocidades, eixos, mancais, sistema de freios sistema de controle e mecanismos de giro da turbina, etc.



Figura 2.1: Protótipo da Turbina V-164 de 8 MW

Fonte: VESTAS WIND

A empresa dinamarquesa *Vestas* construiu a maior turbina eólica Offshore do mundo: a V164-8.0 MW. A turbina tem um rotor com diâmetro de 164 metros instalado numa altura de eixo de 140 metros e tem capacidade de gerar 8 MW utilizando o vento de uma área de 21.124 m².

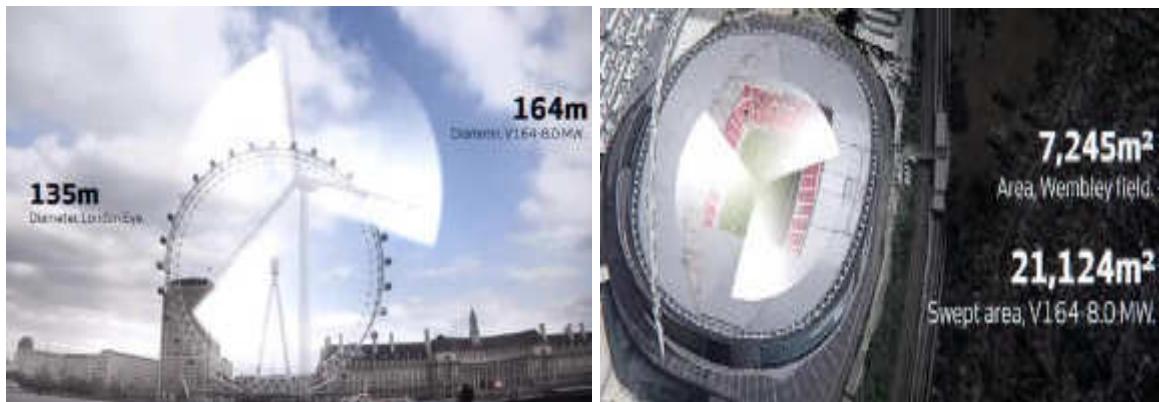
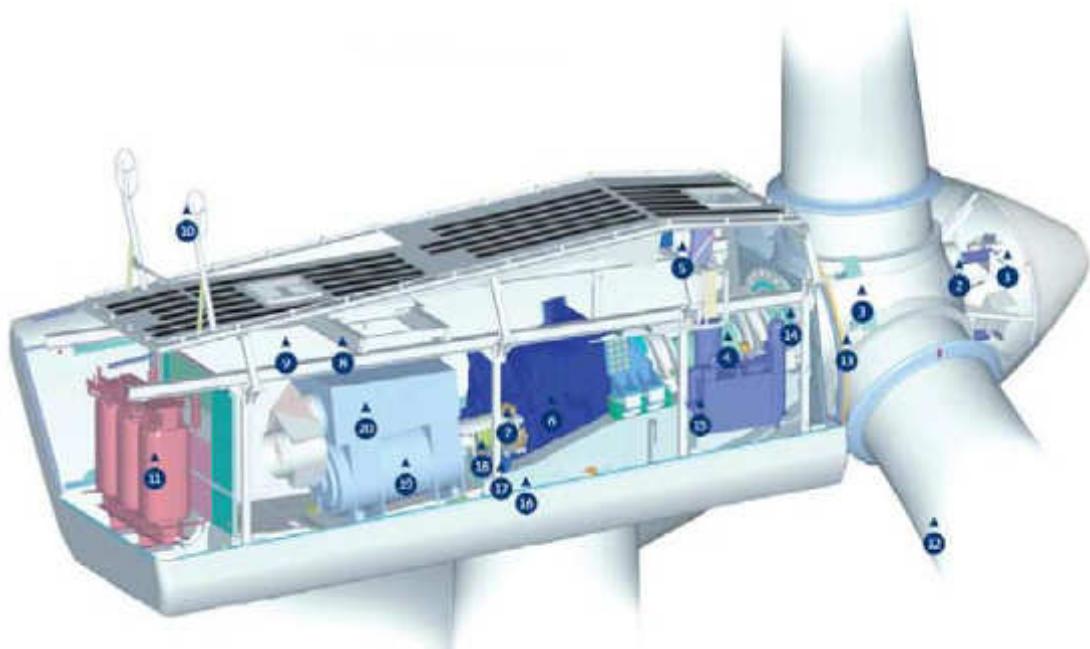


Figura 2.2: Análise comparativa do diâmetro de rotor da turbina offshore V-164

Fonte: Mundo Eléctrico - 2016



- | | |
|---|--|
| 1. Controlador do Cubo | 11. Transformador de alta tensão |
| 2. Controle pitch | 12. Pás |
| 3. Fixação das pás no cubo | 13. Rolamento das pás |
| 4. Eixo principal | 14. Sistema de trava do rotor |
| 5. Aquecedor de óleo | 15. Sistema hidráulico |
| 6. Caixa multiplicadora | 16. Plataforma da nacelle |
| 7. Sistema de freios | 17. Motores de posicionamento da nacelle |
| 8. Plataforma de serviços | 18. Luva de acoplamento |
| 9. Controladores e Inversores | 19. Gerador |
| 10. Sensores de direção e velocidade do vento | 20. Aquecimento de ar |

Figura 2.3: Vista interna esquematizando componentes de uma turbina

Fonte: Catálogo Vestas Wind Turbines

O rotor geralmente apresenta um conjunto de três pás, podendo ter controle passivo ou ativo das mesmas para operar numa determinada rotação. Na maioria das máquinas, o eixo que transmite o torque das pás apresenta uma velocidade de rotação baixa, sendo necessário aumentar a rotação utilizando um multiplicador de velocidades de engrenagens. Após o multiplicador, o eixo é conectado ao gerador elétrico que transforma a energia mecânica em elétrica.

O gerador elétrico pode ser assíncrono (indução), apropriado para trabalhar com rotação constante, ou síncrono, este utilizado em sistemas com rotação variável.

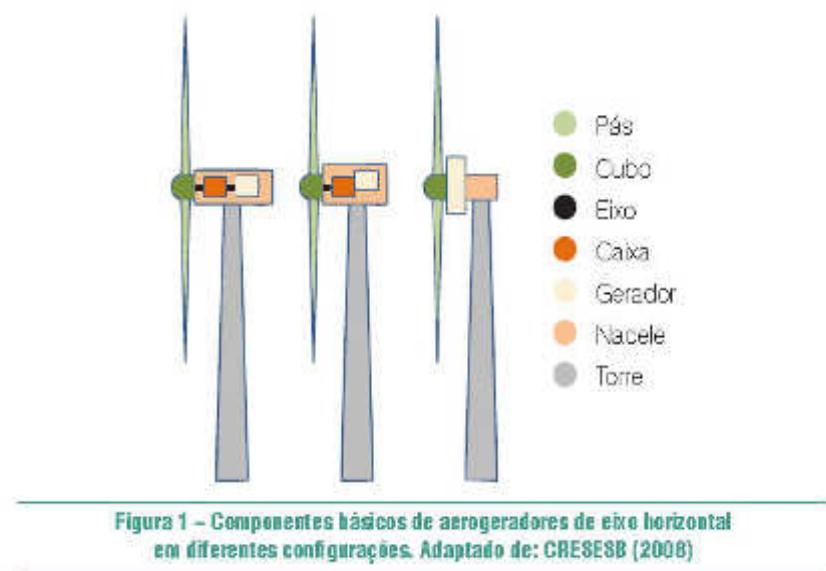


Figura 1 – Componentes básicos de aerogeradores de eixo horizontal em diferentes configurações. Adaptado de: CRESESB (2008)

Figura 2.4: Componentes básicos de aerogeradores de eixo vertical em diferentes configurações

Fonte: Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil - 2014.

Existem também turbinas eólicas de grande porte que utilizam geradores síncronos de imãs permanentes que operam com baixa rotação, dispensando assim a caixa multiplicadora, tal como as máquinas da fabricante alemã *Enercon*. As vantagens e desvantagens de cada modelo são tema de discussão e diversos trabalhos acadêmicos no segmento.



Figura 2.5: Turbina eólica com gerador síncrono de imãs permanentes

Fonte: ENERCON

3. TEORIA DA ENERGIA EÓLICA APLICADA ÀS PÁS

3.1. AERODINÂMICA DE UM AEROGERADOR

A característica aerodinâmica na transformação da energia cinética do vento em energia mecânica e respectivas pressões e forças dinâmicas que aionam uma pá de um aerogerador estão fundamentadas na mecânica dos fluidos pelas teorias de Bernoulli de um fluido em movimento numa superfície e pela teoria do fluxo laminar-turbulento de Reynolds.

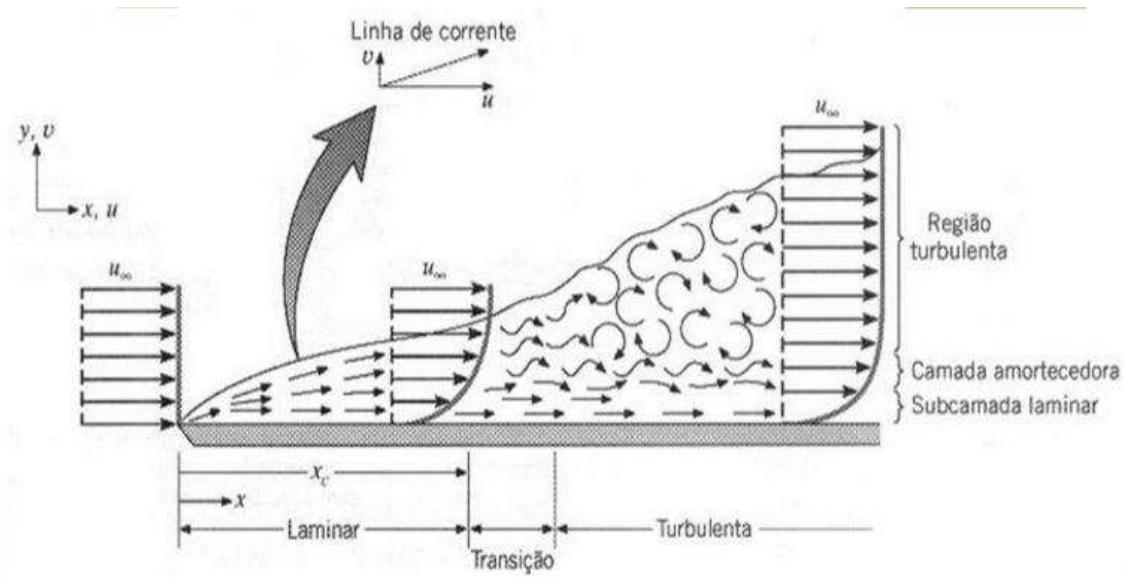


Figura 3.1: Fluxos laminar e turbulentos

Fonte: *Wind Energy Explained* - Manwel

A equação de Bernoulli para um fluxo incompressível é dada por:

$$\frac{v^2}{2} + g \times h + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$$

Equação 3.1

Onde:

v = velocidade do fluido ao longo do conduto [m/s];

g = aceleração da gravidade [9,8 m/s²];

h = altura em relação a um referencial [m];

p = pressão ao longo do conduto [N/m²]; e

ρ = densidade do fluido [kg/m³].

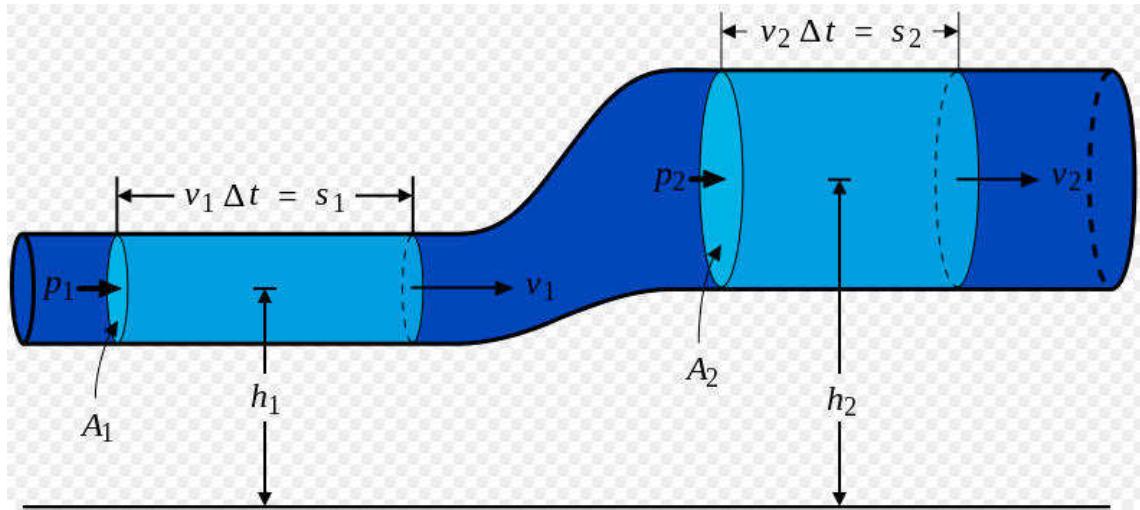


Figura 3.2: Esquema ilustrativo da Equação de Bernoulli

Fonte: Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Ed, John Wiley & Sons

No entanto, as seguintes condições precisam ser satisfeitas para que a equação se aplique:

- Escoamento sem viscosidade ("fricção" interna = 0);
- Escoamento em estado estacionário (fluxo laminar); e
- Escoamento incompressível (ρ constante em todo o escoamento).

No caso específico de $\Delta h=0$, temos que:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$$

Equação 3.2

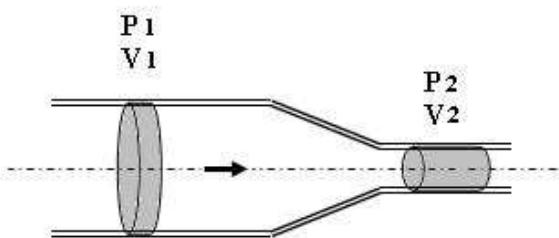


Figura 3.3: Esquema ilustrativo da Equação de Bernoulli com $\Delta h = 0$

Fonte: *Wind Energy Explained* - Manwell

O princípio de Bernoulli pode ser visto como outra forma da Lei da Conservação da Energia, ou seja, em uma linha de corrente, cada tipo de energia pode aumentar ou diminuir em virtude da diminuição ou do aumento das outras duas.

Esta equação permite explicar fenômenos como o Efeito Venturi (Fig. 3-4 abaixo), já que a aceleração de qualquer fluido em um trajeto com igual energia potencial implicaria uma diminuição da pressão. Este efeito explica porque objetos leves muitas vezes tendem a sair de um automóvel em movimento quando se abrem as janelas. A pressão do ar é menor fora devido a que está em movimento em relação aquele que se encontra dentro, onde a pressão é necessariamente maior. De forma aparentemente contraditória, o ar entra no veículo, mas este ocorre por fenômenos de turbulência e camada limite

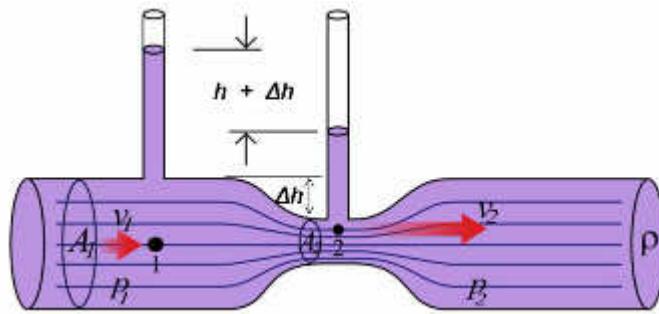


Figura 3.4: Esquema do Efeito Venturi

Fonte: Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Ed, John Wiley & Sons

3.2. ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DOS VENTOS: O COEFICIENTE DE POTÊNCIA E O LIMITE DE BETZ

O aerogerador é uma máquina cuja função é extraír energia cinética do vento. Para que a turbina possa absorver parte dessa energia, o vento deve passar através das pás do aerogerador, numa espécie de “funil de vento”, quando ocorre então uma desaceleração desse fluxo de ar que passa através do rotor.

Considerando-se que a massa do ar afetado permaneça separada do fluido que não passa pelo rotor (e que, portanto, não desacelera), ocorre uma espécie de “separação” entre estas duas massas. Desse modo, a massa de ar que passa pelo rotor forma um tubo circular de corrente, entre o ar anterior e o posterior ao rotor do aerogerador, conforme ilustrado na fig. 3-5 abaixo.

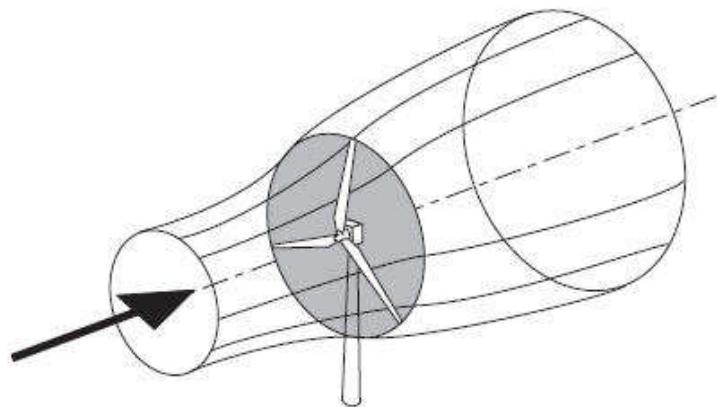


Figura 3.5: O conceito da energia extraída de um fluxo tubular

Fonte: Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Ed, John Wiley & Sons

A energia cinética é extraída do fluxo de ar, causada pela mudança de velocidade no instante da passagem pelo disco do rotor e conforme equação 3.3.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \text{ Joules} \rightarrow P_{eol} = \frac{1}{2} \frac{m}{\text{seg}} v^2; \text{massa} = kg \text{ e } v = m/s$$

Equação 3.3

$$\frac{\text{massa de ar}}{\text{segundo}} = \text{densidade do ar}$$

Equação 3.4

$$\frac{\text{Vol. ar}}{\text{seg}} = \text{densid. do ar} \times \frac{\text{compr. do cilíndro de ar}}{\text{seg}} = \text{densis. ar} \times \text{área} \times \text{vel}$$

Equação 3.5

O ar que se aproxima do rotor sofre desaceleração gradual, e chegando ao disco do rotor, a velocidade do fluido já é reduzida quando comparada com o ar que escoa livremente para fora do tubo de fluxo. Isto resulta numa expansão do tubo de fluxo, já *antes* da passagem pelo rotor. Até este momento, não há extração de energia, e, em consequência, há um aumento na pressão estática do ar para absorver a diminuição de energia cinética.

Durante a passagem do ar pelo disco do rotor, a pressão estática diminui e, portanto, depois da passagem pelo rotor, a pressão está menor que a atmosférica. Na continuação desse fluxo, posterior à passagem pelo disco do rotor, o ar prossegue com velocidade e pressão reduzidas, e esta região é chamada esteira (fig. 3.5). Logo

a seguir, a pressão do ar dentro do tubo de fluxo se reequilibra com a pressão atmosférica.

A origem da energia para a elevação da pressão estática é a energia cinética do ar. Isto, em consequência, reduz a velocidade do vento. Desse modo, comparando a situação das correntes de ar bem anterior e bem posterior à passagem pelo disco do rotor, não há mudança na pressão estática, mas há significativa redução na energia cinética na corrente bem posterior. (Extraído de BURTON *et al.*, 2008).

$$\frac{m}{seg} = m = \rho A v \rightarrow P_{eol} = \frac{1}{2} m v^2 \left(\frac{Joules}{s} \right) = Watts$$

Equação 3.6

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2$$

Equação 3.7

Onde,

D = diâmetro do rotor

Isolando-se m, tiramos que:

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Equação 3.8

Da Lei da continuidade do fluxo, temos que o fluxo mássico que passa pelo rotor é dado por:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = m$$

Equação 3.9

Assim, a potência mecânica é dada por:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

Equação 3.10

Onde, C_p é a eficiência mecânica obtida ou coeficiente de potência.

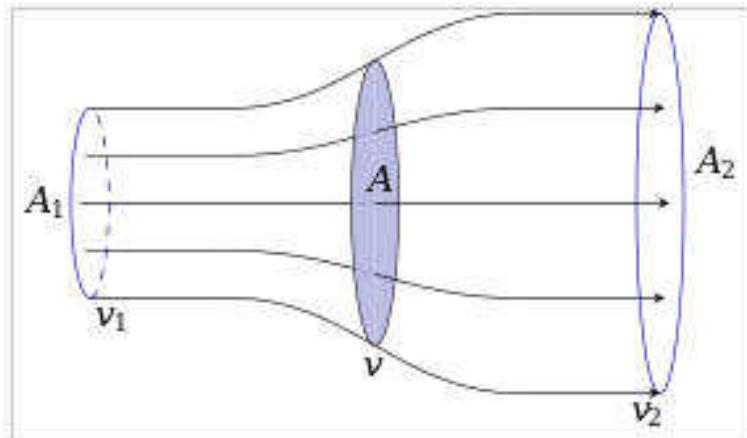


Figura 3.6: Razão da velocidade em função da área varrida

Fonte: BURTON *et al.*, 2008

O coeficiente de potência pode ser expresso diretamente como uma função da razão de velocidades após e antes da turbina, v_2/v_1 .

O coeficiente de potência é função da razão das velocidades e esta relação pode ser expressa graficamente conforme mostra a figura 3.7 abaixo, entre o máximo coeficiente de potência a certa razão de velocidades.

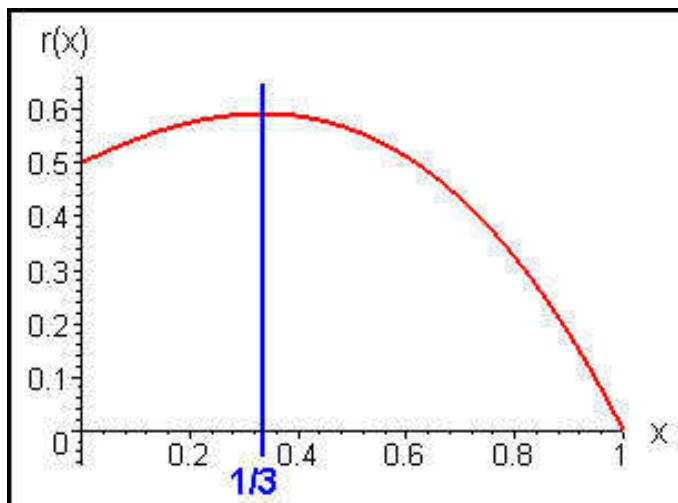


Figura 3.7: Coeficiente de potência em função da razão das velocidades

Fonte: BURTON *et al.*, 2008

O eixo horizontal da fig. reflete a razão entre v_2/v_1 , enquanto que o eixo vertical o coeficiente de potência C_p . Com $v_2/v_1=1/3$, o coeficiente de potência ideal máximo é dado pela equação 3.11 abaixo:

$$C_p(\text{teórico}) = \frac{16}{27} = 59,26\%$$

Equação 3.11

BETZ foi o primeiro a derivar este importante valor, que mais tarde foi chamado de “*Fator de Betz*”. Este valor é válido para projeto teórico para:

- a) Alta relação de velocidade de ponta;
- b) Número infinito de pás;
- c) Força de arrasto nula.

3.3. CONVERSÃO DE ENERGIA, AERODINÂMICA E ESFORÇOS NAS PÁS

3.3.1. DESENHO DAS PÁS

A energia disponível no vento é função da área varrida pelas pás e do cubo da velocidade do vento. Enquanto a área de varredura da pá aumenta com o quadrado do comprimento desta, o seu peso cresce a um expoente de aproximadamente 2,35 de seu comprimento (Mason, 2007). Conforme as pás se tornam maiores, o reforço estrutural principal deve aumentar proporcionalmente de tamanho (Bundy, 2005).

Estudos mostram que a velocidade aumenta proporcionalmente com a altura aonde o vento é capturado. Desta forma, as pás, ao girarem pela ação do vento, dão origem à energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador, que por sua vez produz a eletricidade através de um sistema gerador conjugado ao eixo de rotação do rotor. Por isso mesmo, estão sujeitas a esforços mecânicos e tensões variáveis intensas, conforme a ação dos ventos as quais estão submetidas crescem proporcionalmente.

3.3.2. VELOCIDADE RELATIVA NOS ELEMENTOS DA PÁ E SISTEMAS DE CONTROLE PARA LIMITAÇÃO DE POTÊNCIA

Como visto anteriormente na fundamentação teórica, a potência contida no vento é proporcional ao cubo da velocidade do vento, mas velocidades muito altas de vento ocorrem com uma frequência relativamente pequena. Desta forma, estes ventos pouco frequentes, acima de 25m/s, não contribuem muito para a energia gerada, e por isso mesmo não seria prudente projetar aerogeradores para operar eficientemente sob tais condições, uma vez que os elevados carregamentos nas pás e as grandes potências de pico acrescentariam custos extras substanciais ao dimensionamento do

aero gerador, e assim sendo, dariam um incremento de energia gerada proporcionalmente muito pequeno. Estes custos extras podem ser evitados se for limitada a potência do aero gerador para ventos fortes. Por isso mesmo, esses sistemas realizam operações de segurança de frenagem para velocidades de vento superiores a 25 m/s. Isto é mais frequentemente conseguido arranjando-se para que toda extensão da pá (ou apenas parte dela) seja rodada em torno de seu eixo longitudinal, de forma a aumentar o ângulo de passo da hélice “*pitch control*”, o que reduz as cargas e a eficiência aerodinâmica durante o período de ventos fortes. A variação de passo limita a rotação e as cargas aerodinâmicas. O enfoque alternativo seria usar pás de passo fixo, que tornam o cubo mais barato e simples de se fabricar, em conjunto com gerador de rotação constante, deixando que a pá estole e limite a potência, quando sob ventos fortes. A rotação constante pode ser facilmente obtida para geradores conectados à rede, pelo emprego de gerador síncrono ou de indução. Então, à medida que a velocidade do vento aumenta, o ângulo de ataque em que o escoamento encontra a pá também aumenta, criando uma zona de turbulência no bordo de fuga da pá (fig. 3.12 abaixo), até que o escoamento sobre o rotor descola e a potência gerada se reduz. Esse é o chamado efeito stoll ou “*stoll control*”.

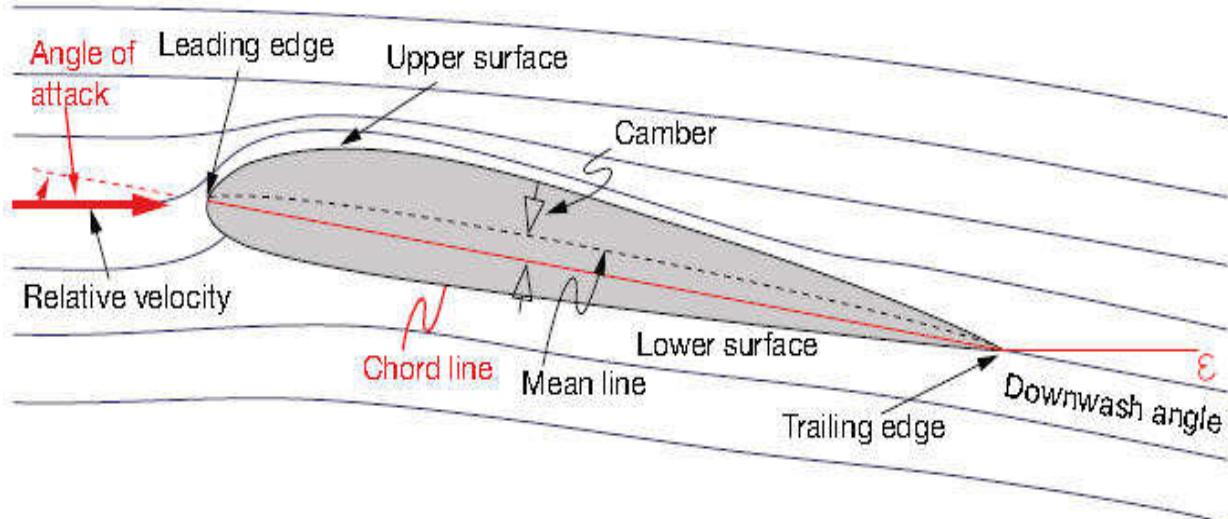


Figura 3.8: Vista esquemática do efeito de estolamento de uma pá

Fonte: BURTON, SHARPE, JENKINS, BOSSANYI; 2008



Figura 3.9: Rotação das pás para “Pitch Control”

Fonte: ALSTOM

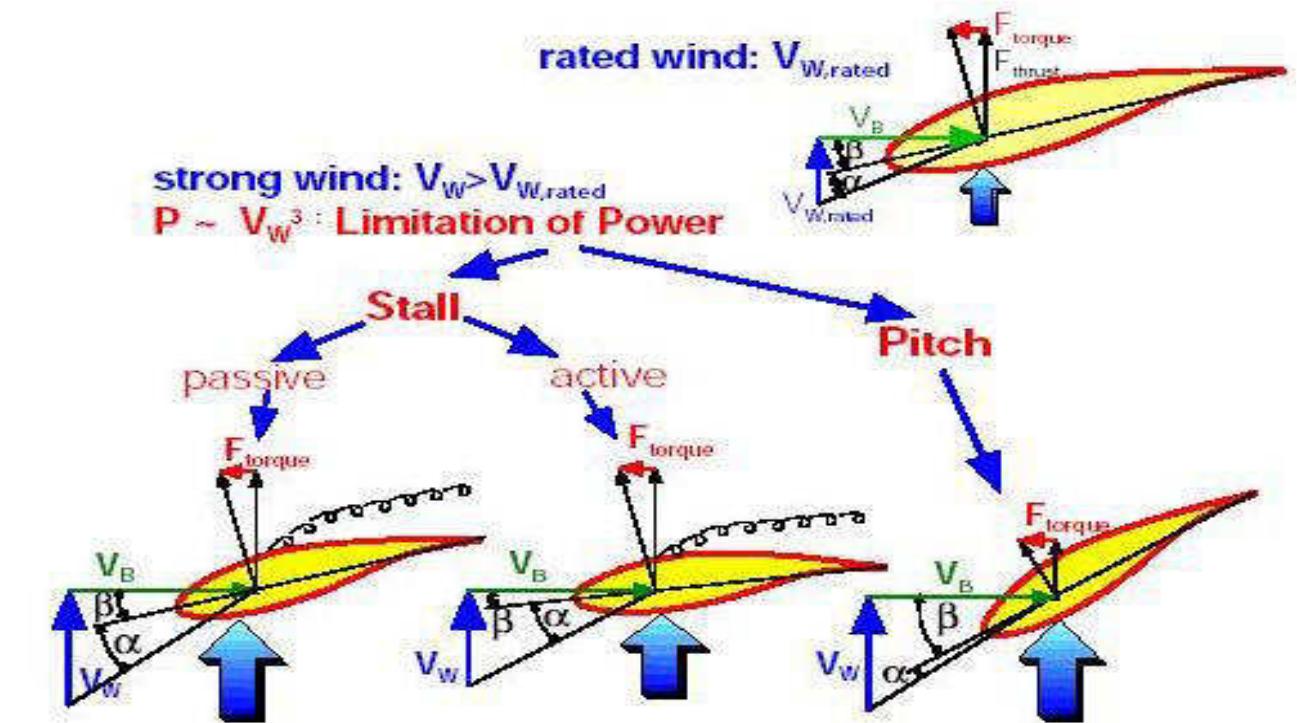


Figura 3.10: Vista esquemática do controle de *stall* e *pitch* em uma pá eólica

Fonte: www.sabaniroo.co.ir

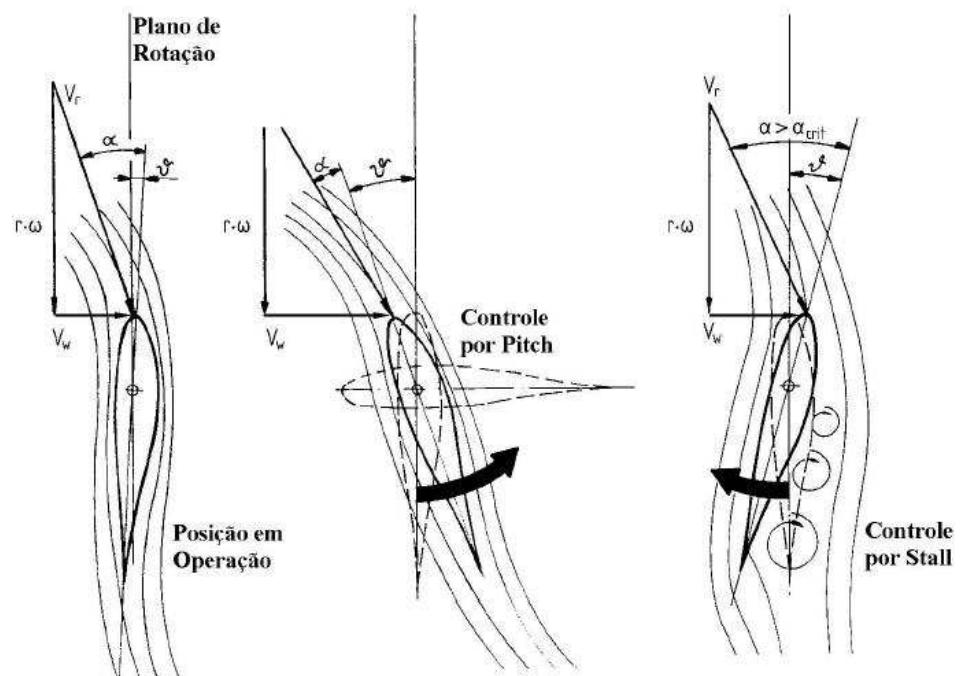


Figura 3.11: Controle de “pitch” e “stall”

Fonte: BURTON, SHARPE, JENKINS, BOSSANYI; 2008

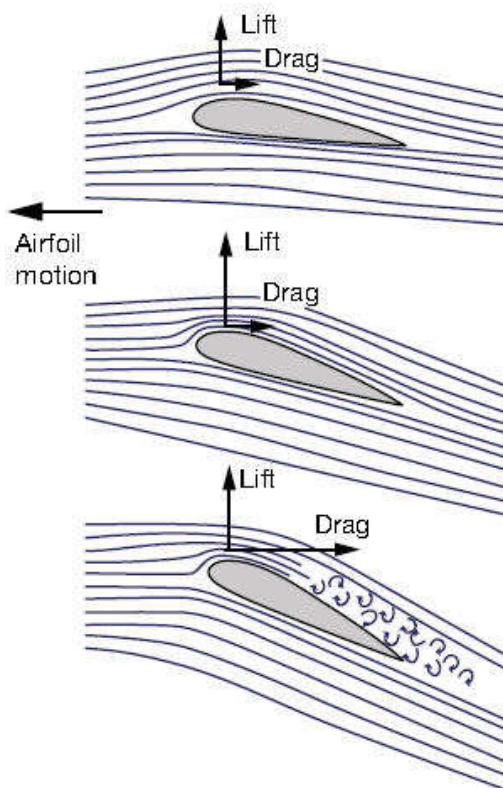


Figura 3.12: Esteira de turbulência após controle de *pitch*

Fonte: *Wind Energy Handbook*: BURTON, SHARPE, JENKINS, BOSSANYI; 2008

3.3.3. ANATOMIA DE UMA PÁ

Uma pá de uma turbina eólica está dividida em diferentes secções, conforme mostra a figura abaixo:

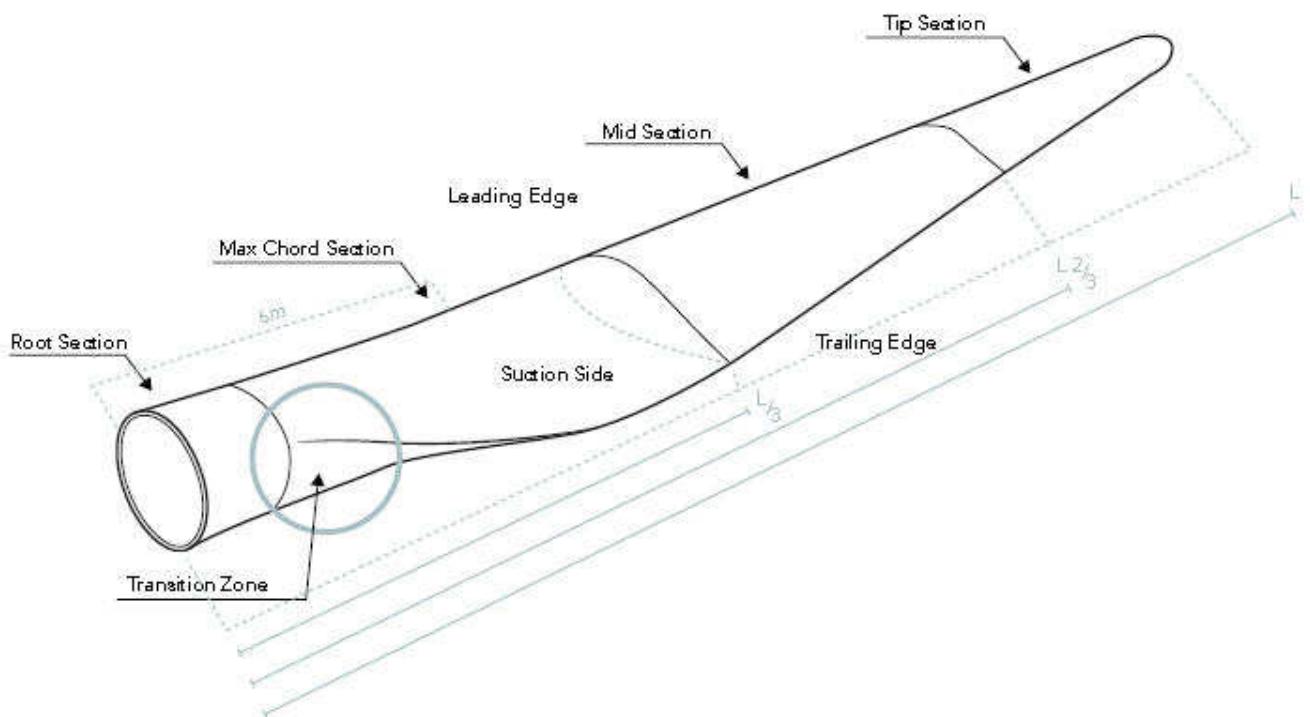


Figura 3.13: Anatomia de uma pá

Fonte: *LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016*

A figura 3.14 abaixo mostra o corte transversal de uma pá, aonde vemos os principais termos e elementos construtivos da secção de uma pá eólica genérica, sendo:

- Leading Edge: bordo de ataque – LE;
- Trailing Edge: bordo de fuga ou escoamento – TE;
- Pressure side: superfície inferior, ou lado de pressão do vento – PS;
- Suction side: superfície de cima da pá, aonde ocorre sucção do vento – SS;
- Web: reforços estruturais transversais;
- Spar cap: longarinas estruturais centrais;
- Shear Webs: reforços anti cisalhamento;

- Trailing edge bondline: o adesivo que une as duas cascas no bordo de fuga da lâmina ou pá.

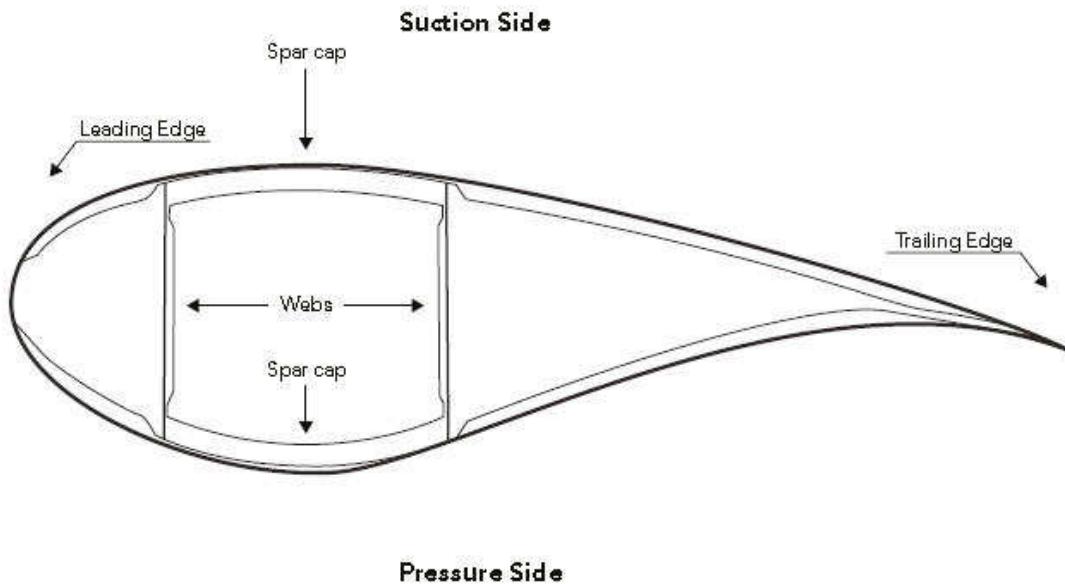


Figura 3.14: Corte Transversal de uma pá e seus elementos construtivos

Fonte: Cortesia: Bladena – Blade Enabler – Denmark, LEX Handbook 2015

NOTA: a tradução do inglês para os termos mostrados na figura 3.13 acima visa facilitar a compreensão da análise das cargas atuantes nas pás quando estas são submetidas a cargas dinâmicas pela ação dos ventos.

3.3.4. GEOMETRIA E FORÇAS ATUANTES NA PÁ

Aerogeradores de eixo horizontal são máquinas formadas por um rotor ao qual solidariamente estão fixadas um certo número de pás, mais comumente três (03). Oriundos das correntes de vento que incidem e varrem essas pás, manifestam-se esforços aerodinâmicos que atuam sobre a estrutura como um todo, especialmente tensões que causam fadiga e desgaste nos bordos de ataque, entre outras situações que examinaremos no capítulo de falhas. A seguir, poderemos examinar os casos de tipos de cargas atuantes nas pás quando em funcionamento ou testadas em escala plena:

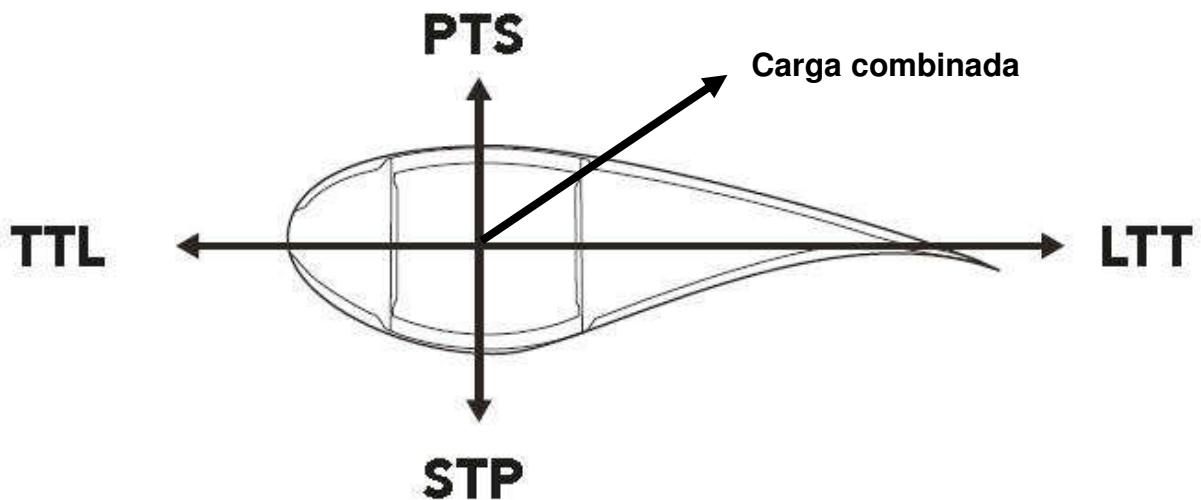


Figura 3.15: Geometria e esforços atuantes em uma pá eólica

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

- **PTS** – do lado de pressão para o lado de sucção;
- **STP** – do lado de sucção para o lado de pressão;
- **TTL** – do bordo de fuga ao bordo de ataque;
- **LTT** – do bordo de ataque ao bordo de fuga;
- Carga Combinada ou composta por PTS e LTT.

3.3.5. TENSÕES E DEFORMAÇÕES ESTRUTURAIS

Tensões e deformações são ambas respostas para o carregamento de uma estrutura, ou quando estáticas ou quando submetidas a ação dinâmica dos ventos. As deformações são mudanças relativas de comprimento, e as tensões são a resposta do material para as cargas recebidas. Por isso, as tensões devem estar em equilíbrio com as cargas ou esforços solicitantes atuantes nessas complexas estruturas. Pelo fato de as pás serem estruturas que recebem continuamente cargas dinâmicas, além das estáticas, a tensão e a deformação devem estar “acopladas” através do modelo de material utilizado nas pás, como rege a “Lei de Hooke”, que demonstra que muitos materiais elásticos apresentam deformação diretamente proporcional a uma força elástica, resistente ao alongamento produzido. O esquema abaixo nos ajuda a compreender o fenômeno:

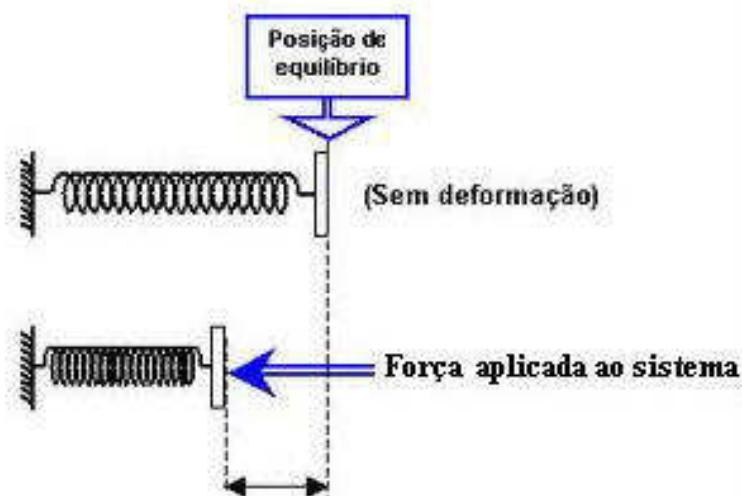


Figura 3.16: Fig. Esquemática do Princípio da Lei de Hooke

Fonte: Mundo Físico

As tensões poder ser divididas em tensões axiais e de alongamento individual das fibras, respectivamente, conforme mostra a fig.3-17 a 3-19 abaixo:



Figura 3.17: Tensões axiais e de alongamento nas fibras

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

O outro tipo de deformação atuante é a de cisalhamento, que muda o ângulo entre as fibras, conforme abaixo:

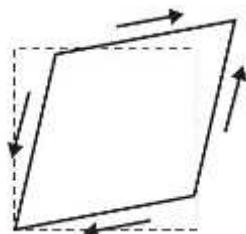


Figura 3.18: Tensões de cisalhamento atuantes nas fibras de uma pá

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

Já as cargas podem ser similarmente classificadas em axial, em direção às fibras da pá, ou de flexão, que pode ser um resultado de flexão de uma viga ou de uma ação de alongamento de um pino ou secção de um corpo de prova padrão, por exemplo, conforme mostrado na fig. 3.19 abaixo.

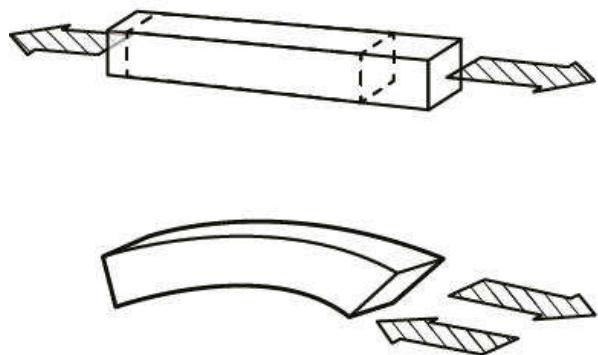


Figura 3.19: Cargas Axial e de Flexão

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

O outro tipo de tensão é a de cisalhamento ao longo das superfícies das fibras (fig. 3.20). Tensões de cisalhamento podem ser vistas nas junções das pás nos bordos de fuga ou quando ocorre a torção de uma secção transversal da pá pela ação do vento.

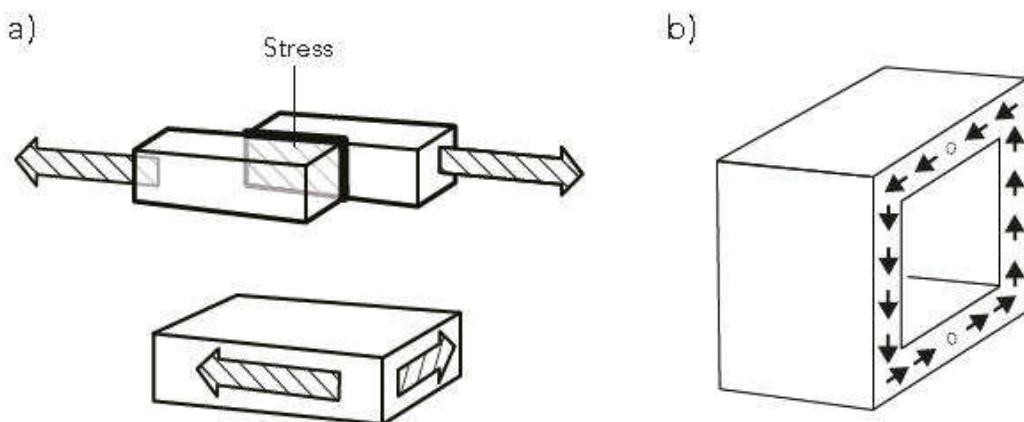


Figura 3.20: Tensões de Cisalhamento superficial

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

3.3.6. VELOCIDADE DE PONTA (VELOCIDADE TANGENCIAL) OU “BLADE TIP”

O coeficiente de velocidade de ponta ou X (TSR – *Tip Speed Ratio* em Inglês), é a razão entre a velocidade tangencial na ponta da pá e a velocidade em que o vento a atinge naquele momento. O TSR está relacionado à eficiência, sendo esta otimizada com as possíveis variações no desenho das pás. Velocidades de ponta mais altas geralmente estão associadas à maiores níveis de ruído de operação da

máquina, e por isso mesmo necessitam de pás mais robustas devido às altas forças centrífugas associadas.

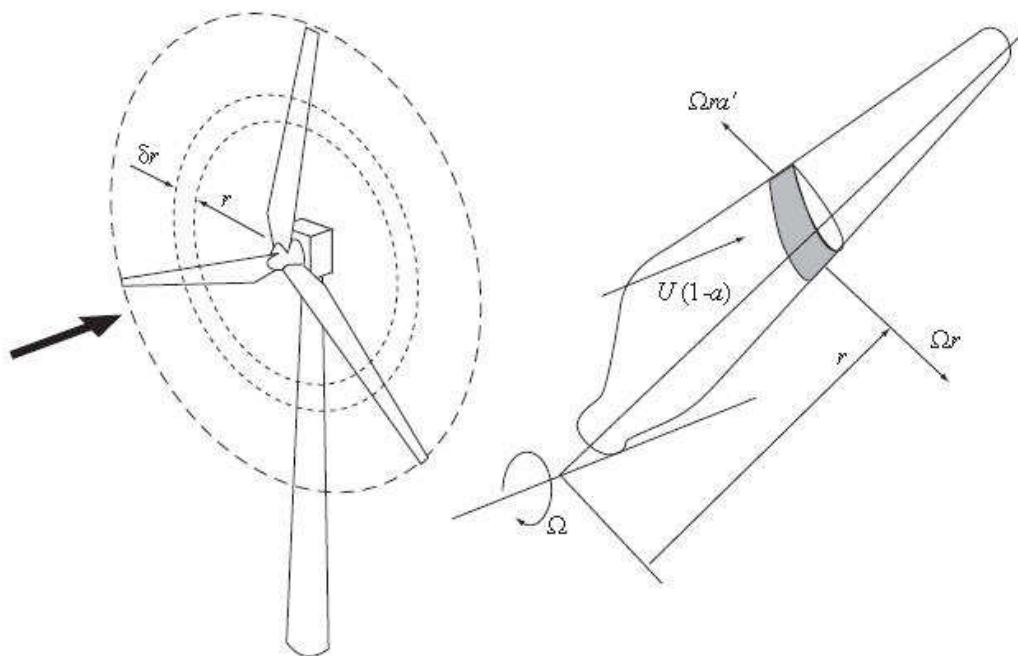


Figura 3.21: Visão esquemática da velocidade de ponta ou “tip speed”

Fonte: Wind Energy Handbook: BURTON, SHARPE, JENKINS, BOSSANYI; 2008

$$\lambda = RV = \frac{\omega R}{V_1}$$

Equação 3.12

Onde:

λ = Razão de velocidade de ponta de pá

ωR = Velocidade tangencial de ponta de pá

ω = Velocidade angular

R = Raio da pá

V_1 = Velocidade do vento não perturbado

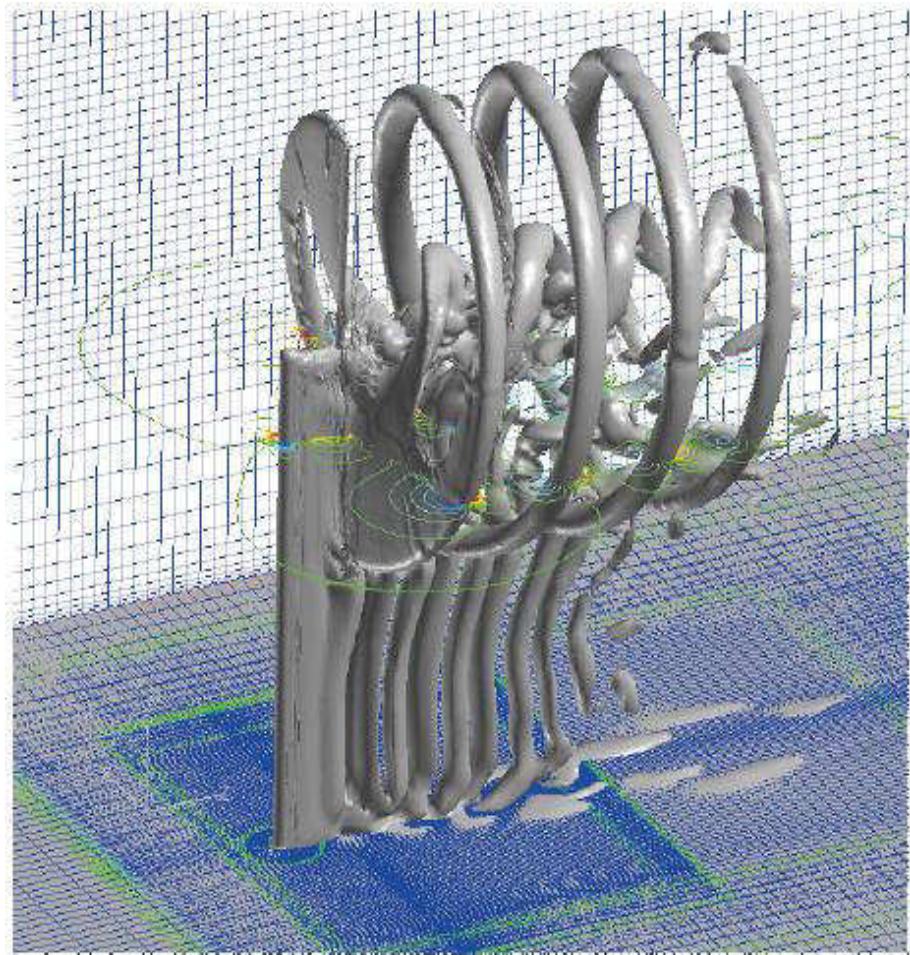
O Índice de velocidade de ponta, “*tip speed ratio*” é de vital importância na concepção de aerogeradores. Se o rotor da turbina gira muito lentamente, a maior parte do vento vai passar sem ser perturbado através do espaço entre as pás do rotor. Alternativamente, se o rotor gira muito rapidamente, o fluxo gerado aparece como uma parede sólida para o vento. Portanto, as turbinas eólicas são concebidas com média ideal de velocidade de ponta para extrair o máximo de energia do vento possível.

Quando uma pá do rotor passa através do ar, ela deixa certa turbulência no seu rastro. Se a próxima lâmina do rotor chegar a este mesmo ponto enquanto o ar ainda estiver em regime turbulento, ela não conseguirá extrair energia de forma eficiente desse vento. No entanto, se o tempo de giro do rotor for um pouco mais lento, com o vento “limpo” atingindo plenamente cada lâmina da turbina, esse regime então não seria mais turbulento e, portanto, a velocidade da ponta estaria otimizada naquela situação. <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-turbine-tip-speed-ratio/>
(Acessado em agosto de 2016)

O cálculo de velocidade da ponta é determinado dividindo-se a velocidade das pontas das pás da turbina com a velocidade do vento - por exemplo, se um vento de 20 km/h sopra sobre uma turbina e as pontas das suas pás estão a 80 km/h, então a razão de velocidade de ponta é $80/20 = 4$. A velocidade angular dos rotores (ω) pode variar na faixa de 15 a 220 rpm (nas grandes máquinas não excedem a faixa dos 20-25 rpm). Rotações maiores ficam restritas devido à velocidade tangencial na ponta das pás, que operam na ordem de 50 a 110 m/s, quase independentemente do tamanho do diâmetro. Para se ter uma ideia mais concreta do que isso significa, uma pá de cerca de 52 metros de comprimento, trabalhando a um fator de capacidade F_c de 35 a 37%, com rotação na faixa citada de 20 a 25 rpm, tem uma velocidade de ponta de cerca de 350Km/hora e percorre em um ano algo cerca de 2.7 Milhões de Km.

- Optimização da velocidade de ponta: A razão ótima da velocidade de ponta depende do número de pás existente no rotor da turbina. Quanto menor o número de pás, mais rápido o rotor da turbina eólica precisa girar para extrair a potência máxima do vento. Um rotor de duas pás tem uma razão ótima velocidade de ponta de cerca de 6, enquanto um rotor de três lâminas de cerca de 5, e um rotor de quatro pás cerca de 3.

O desenho e dimensionamento de uma pá do rotor para ser eficiente pode aumentar estes valores ótimos em cerca de 25-30%, aumentando-se consideravelmente a velocidade com que o rotor gira e, portanto, a geração de energia. Um rotor típico de três pás a 120° bem concebido, teria uma relação de velocidade de ponta de cerca de 6 a 7.



Courtesy Zahle, F., Sørensen, N. N., & Johansen, J. (2009). Wind Turbine Rotor-Tower Interaction Using an Incompressible Overset Grid Method. *Wind Energy*, 12(6), 594-619. 10.1002/we.327

Figura 3.22: Detalhes da interação aerodinâmica entre torre e rotor são vistos à direita da figura

Fonte: Zahle, Sørensen, Johansen; 2009

Se a relação de velocidade de ponta é muito baixa - por exemplo, se são utilizadas pás do rotor mal concebidas – o aerogerador tende a retardar e / ou “estolar”. Se por sua vez a relação de velocidade de ponta é muito alta, a turbina vai girar muito rápido através do ar turbulento, e não se conseguirá otimizar a potência extraída do vento. Nesta situação, a turbina eólica estará sob efeito de altas cargas estruturais e consequente risco de falha estrutural.

VORTEX: A fig.3.22 acima mostra um sistema de vórtices detalhado no rastro de uma turbina. Neste caso particular, uma turbina de duas pás. A ponta e a raiz do sistema de vórtice, assim como a sombra da torre podem ser vistos na figura.

4. CARGAS ESTRUTURAIS E MATERIAIS COMPÓSITOS

4.1. A IMPORTÂNCIA DO COMPORTAMENTO ELÁSTICO NOS MATERIAIS APLICADOS ÀS PÁS EÓLICAS

Os materiais podem se comportar de muitas maneiras, mas para as pás eólicas, o comportamento mais importante é o elástico. Para os materiais isotrópicos, ou seja, aqueles cuja tensão é igual em todas as direções de carga, o comportamento do material é descrito pelo módulo de elasticidade E , que define a tensão axial para um determinado incremento de tensão aplicada. O Coeficiente de Poisson por sua vez, define a deformação perpendicular à direção da tensão. Para a tensão aplicada em uma determinada direção, esta será menor nas duas direções perpendicularmente opostas, conforme mostra a fig.4-1 abaixo:

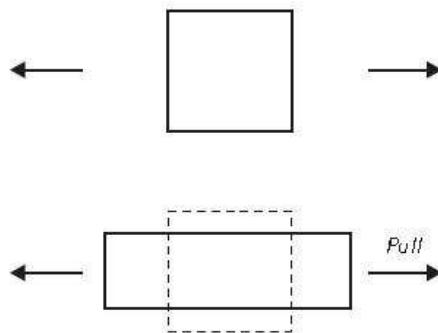


Figura 4.1: Deformação elástica

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

Como sabemos, materiais submetidos a cargas repetitivas podem apresentar falhas devido às tensões acumuladas. O número de ciclos de carga repetitiva ao qual a pá de uma turbina eólica está submetida é muito grande. Os problemas de fadiga, muitas vezes ocorrem justamente nas junções, isto é, nos locais onde os diferentes feixes de fibra longitudinal se encontram ou se mesclam entre si, como por exemplo nos bordos de fuga, conforme mostra a fig. 4-2 abaixo. Problemas de fadiga no sentido transversal das fibras, quando ocorrem, são oriundos de tensões secundárias, e por isso mesmo não tão críticos.

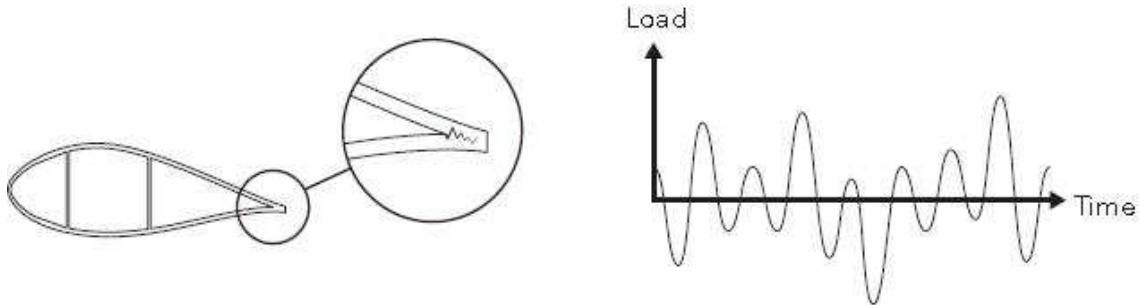


Figura 4.2: Efeito e Comportamento da Fadiga ao Longo do Tempo

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

As características em relação à fadiga são essenciais no projeto e aplicação dos aerogeradores, em especial nas pás das turbinas eólicas. A literatura apresenta diversas informações em relação às pás de grande porte, de forma que para se determinar tais características torna-se fundamental entender o comportamento dos materiais utilizados em condições estáticas para posteriormente se realizar ensaios cíclicos. Neste sentido, (BARROS, A. S.) em seu trabalho – *"Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas"*, procurou explorar as principais propriedades mecânicas a tração (módulo de elasticidade e limite de resistência à ruptura) dos materiais utilizados na confecção de pás de aerogeradores.

Atualmente, os produtores de geradores eólicos estão procurando fornecer turbinas cada vez mais eficientes às companhias de energia elétrica, a um custo cada vez mais baixo. (Dawson, 2005). Desta forma, o aumento da potência de saída das atuais turbinas eólicas está atrelado à necessidade de utilização de pás cada vez maiores. Conforme (McGUGAN, PEREIRA, Sørensen, TOFTEGAARD, BRANNER; 2015) em seu trabalho, *"Damage tolerance and structural monitoring for wind turbine blades"*, a maneira mais eficaz de aumentar a potência produzida por uma turbina eólica é aumentando o comprimento das pás do rotor. Como a energia produzida pelos aerogeradores é proporcional à área varrida pela pás, além do cubo da velocidade do vento, um dos grandes desafios futuros é projetar pás de rotor cada vez maiores, de forma a que elas possam suportar um mínimo de 20 anos de serviço em ambientes diversos, inclusive *"offshore"*. Pás do rotor são feitas como peças únicas, contínuas e muito grandes, usando materiais compósitos de fibra de baixo custo relativo e métodos de fabricação igualmente de relativo baixo custo. Por isso mesmo, não é

possível fabricar lâminas 100% "perfeitas" ((McGUGAN, PEREIRA, Sørensen, TOFTEGAARD, BRANNER; 2015)

Conforme examinado na secção 3.3.4, manifestam-se sob as pás esforços aerodinâmicos intermitentes, especialmente tensões diversas que causam fadiga e desgaste nos bordos de ataque e de fuga.

4.2. COMPÓSITOS

Compósitos nada mais são do que diversas camadas de um determinado material, coladas e sobrepostas conjuntamente em diferentes direções. Nos materiais compósitos, as fibras podem ser dispostas de várias maneiras diferentes, de modo que a resistência e a rigidez dependerá da direção em que for disposto o material. Em pás de turbinas eólicas, haverá mais fibras na direção da lâmina, ou seja, paralela a pá, de forma a permitir a movimentação da pá de forma flexível, o que não ocorre na direção transversal, com menos fibras.

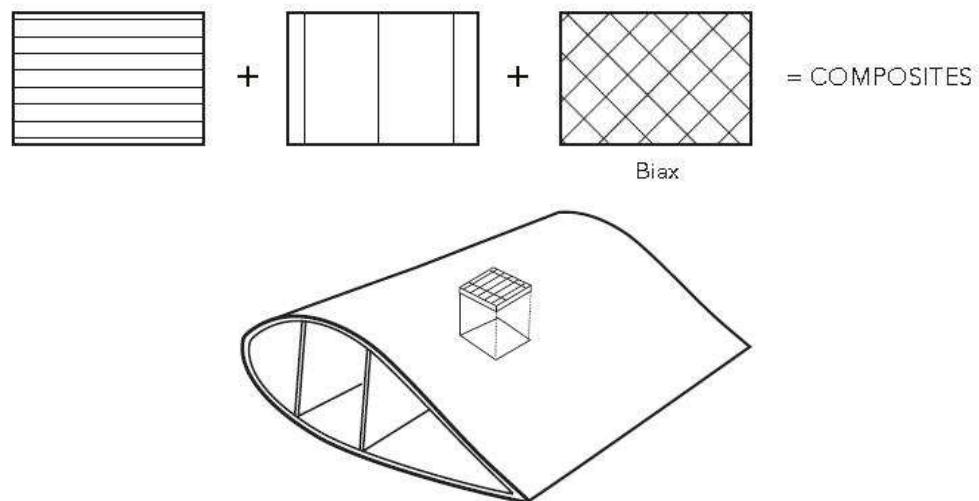


Figura 4.3: Estrutura dos Compósitos

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

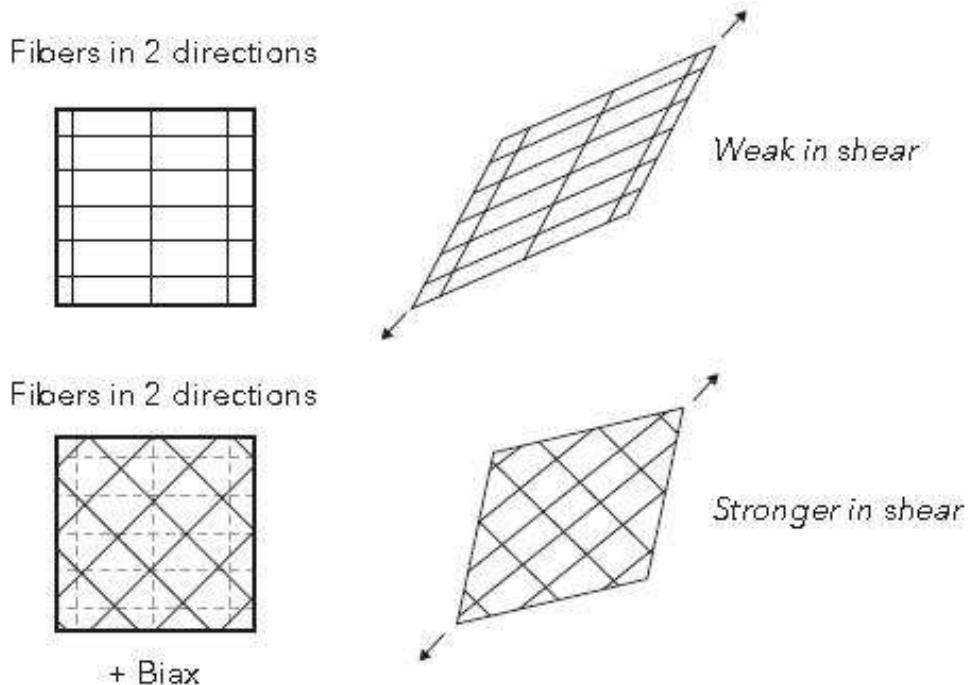


Figura 4.4: Alongamento estrutural das Fibras-Compósitos

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

As principais vantagens dos materiais compósitos são:

- a. Leveza e facilidade no transporte
- b. Resistencia química
- c. Resistencia ao intemperismo
- d. Flexibilidade arquitetônica
- e. Durabilidade
- f. Fácil manutenção
- g. Resistencia mecânica
- h. Transparência a ondas eletromagnéticas (sinais)

4.3. VIGAS ESTRUTURAIS

Pás eólicas atuam como uma viga, ou seja, uma estrutura engastada ao longo e na direção de seu comprimento. As vigas utilizadas em projetos de construção civil, por exemplo, possuem cortes transversais com secções constantes, o que no caso das pás eólicas, não ocorre. A fim de se ter uma forma mais resistente e otimizada, deve-se projetá-las de forma torcida assim como cônica.

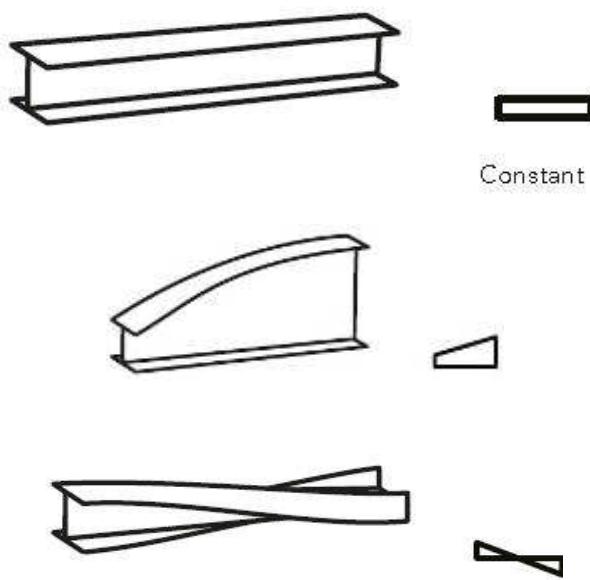


Figura 4.5: Vigas estruturais nas pás podem assumir formas cônicas ou torcidas

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

O desenho típico de uma pá (lâmina) de uma turbina eólica, normalmente vai ser côncico e torcido. Além disso, as espessuras deverão ser relativamente pequenas, o que pode provocar pequena deformação na secção transversal. Se considerarmos a teoria do feixe tradicional, as deformações transversais não são passíveis de ocorrer. Contudo, em pás de turbinas eólicas, estas podem ser observadas, por exemplo, em torções de cisalhamento.

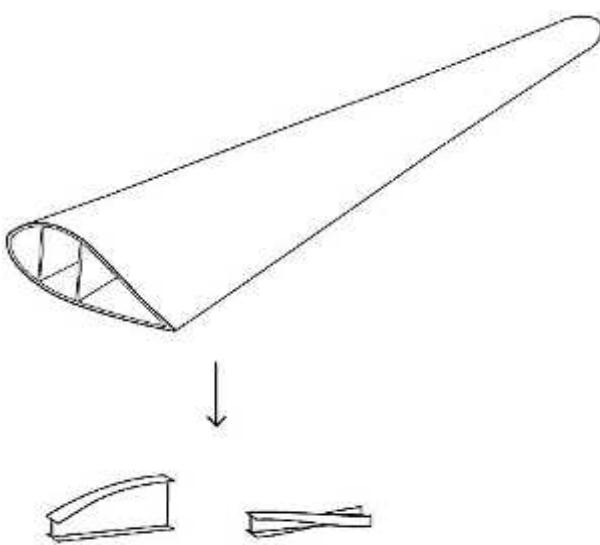


Figura 4.6: Visão esquemática do comportamento torcional em uma viga estrutural de uma pá

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

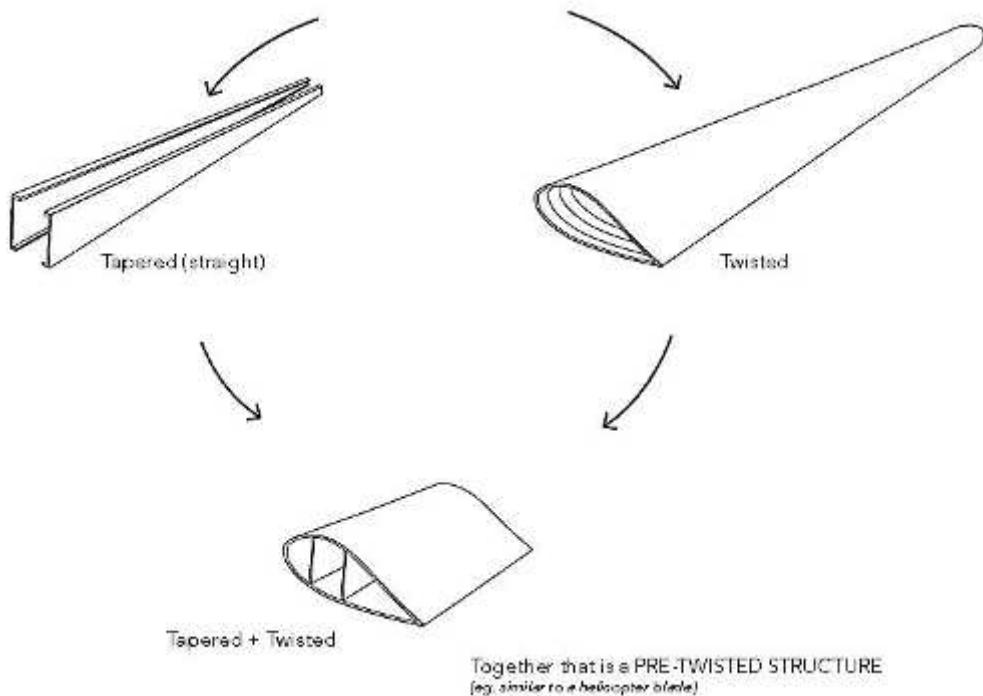


Figura 4.7: Vigas estruturais nas pás podem assumir as formas cônica ou torcionadas

Fonte: BLADENA Handbook, 2016

4.4. FLEXÃO E TORÇÃO

A carga exercida sobre uma pá de turbina eólica resulta principalmente da pressão exercida pelo vento, da gravidade e das contribuições de forças de aceleração, como por exemplo forças centrífugas; porém a principal forma com que as cargas são conduzidas às pás é através da flexão:

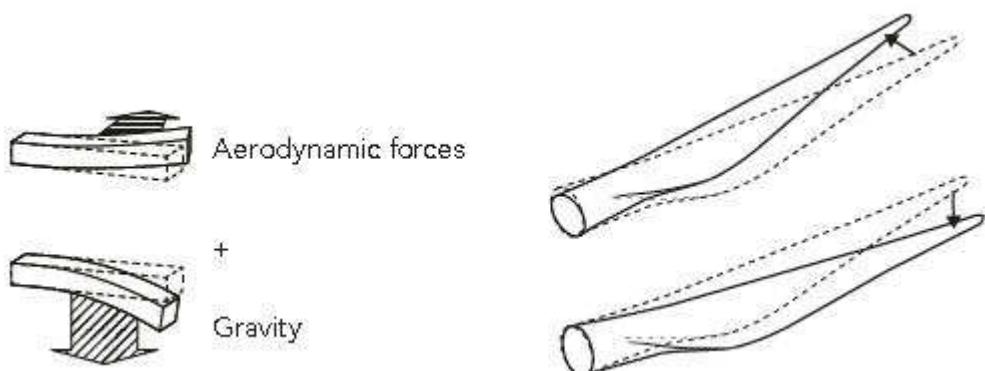


Figura 4.8: Modos de cargas de Flexão

Fonte: Bladena Handbook 2016

Concomitantemente, ocorrem esforços de tração e compressão oriundos das forças gravitacionais e centrífugas, estes últimos quando a pá está em movimento.

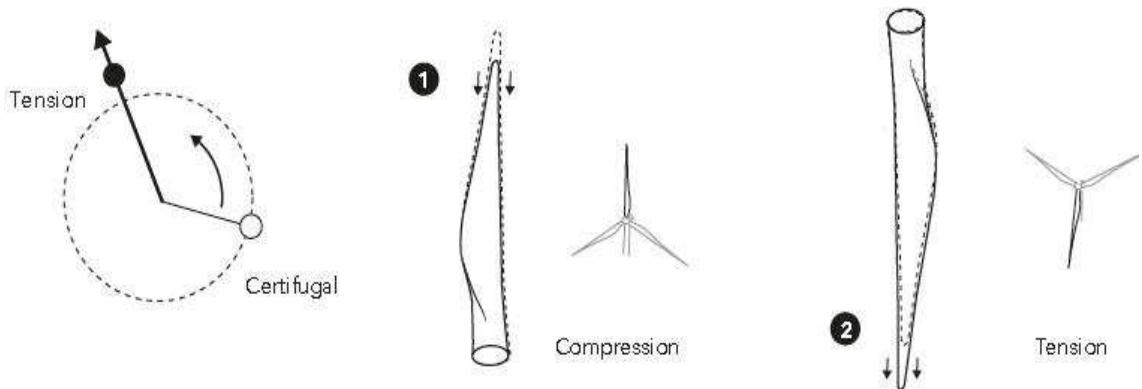


Figura 4.9: Modos de carga de tração e compressão

Fonte: RATZ Handbook

No caso da Torção, os ventos causam esforços excêntricos, que torcionam as pás conforme demonstrado na figura 4-10 abaixo:

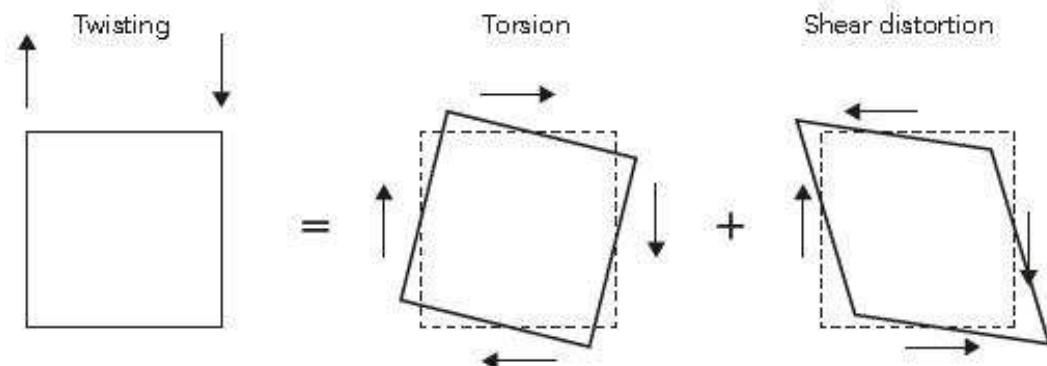


Figura 4.10: Movimento e esforços torcionais de uma pá

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

O esforço de torção conforme mostrado no esquema acima, causa uma rotação da secção transversal (torção) e uma alteração da secção transversal da pá (distorção por cisalhamento). Essas tensões de cisalhamento tornam-se mais dominantes e intensas para pás de turbinas eólicas mais finas ou delgadas. Contudo, a intensidade ou parcela de contribuição desses esforços não pode ser quantificada através da tradicional *Teoria do Feixe Invertível*, (Ravi Vakil - *INTRODUCTION to ALGEBRAIC GEOMETRY*) porém, pode ser visualizada e confirmada através de uma

análise de elementos finitos, cujo modelo matemático incitado por cargas dinâmicas mostra bem essa situação.

4.5. VIBRAÇÕES

- Frequência Natural: Pás Eólicas estão sujeitas a diferentes frequências naturais dependendo da direção da vibração. Ou seja, podem assumir vibrações torcionais, nos bordos superiores ou nos bordos inferiores. Uma frequência natural é aquela inerente, na qual uma pá adotará suas vibrações livres, quando colocada em movimento através de um único impulso ou deslocamento momentâneo, a partir de sua posição de repouso, embora não sendo influenciados por outras forças externas. Uma pá tem muitas frequências naturais diferentes e cada uma delas tem seu próprio modo distinto de vibração. No entanto, quanto mais baixa a frequência, tanto maior será a amplitude nos modos de vibração. Assim, na prática, apenas algumas das frequências mais baixas determinam a vibração total da pá. As frequências naturais de uma pá são dadas pela rigidez, em massa, e pela sua distribuição do amortecimento da estrutura a qual está submetida. (*Ratz Handbook*)
- Ressonância: A ressonância pode ocorrer quando uma pá eólica é excitada por forças periódicas externas a uma frequência perto de uma de suas frequências naturais. Forças periódicas pequenas, a uma frequência de ressonância por exemplo, podem acumular-se para produzir grandes e violentas oscilações na estrutura.
- Amortecimento: O amortecimento reduz a amplitude das vibrações numa estrutura por dissipação da energia do sistema. Essa energia pode ser dissipada na estrutura através do atrito, com consequente geração de calor, ou então por meio de dispositivos mecânicos, como por exemplo, um amortecedor viscoso (freio dinâmico amortecedor).

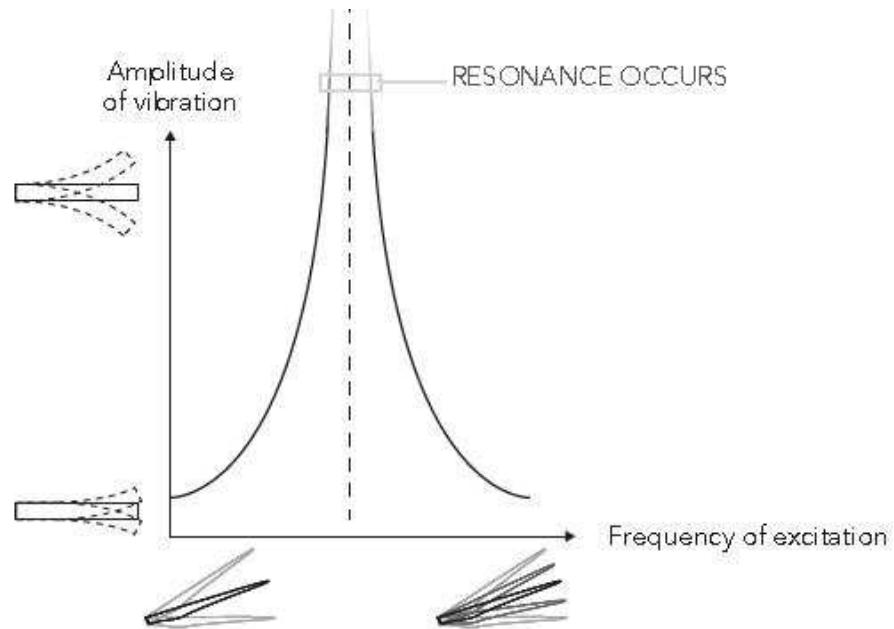


Figura 4.11: Vibração SEM amortecimento

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

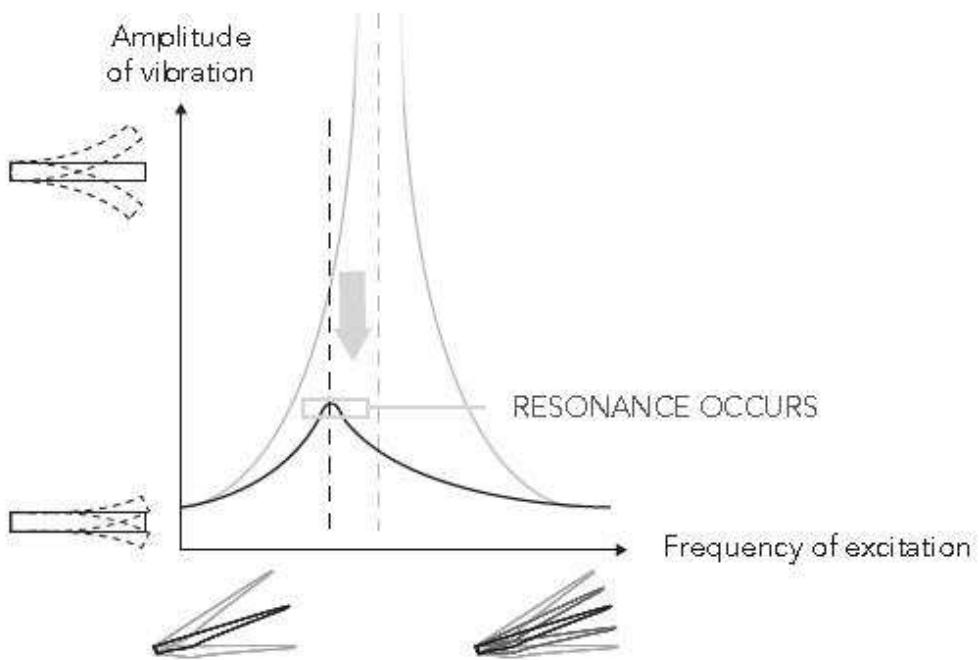


Figura 4.12: Vibração COM amortecimento

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

Também, é importante entendermos cargas as quais os aerogeradores estão sujeitos e que influenciam diretamente nos esforços e nos modos de falha nas pás. A tabela 4-1 abaixo, lista e descreve tais cargas:

Tabela 4.1: Tipos de cargas atuantes nos aerogeradores

TIPO DE CARGA	CARACTERÍSTICA	EXEMPLO
1. Estáticas (Não rotativas)	Constantes e atuantes na estrutura	Peso da nacelle
2. Fixas rotativas	Cargas cuja intensidade não varia com o tempo, mas tem direção variável	Força centrífuga no corpo e na ponta de cada pá
3. Cíclicas	Variam com o tempo. Acontecem devido a fatores tais como:	Peso das pás, variação da velocidade do vento com a altura e movimento de guinada.
4. Transitórias	Causadas por efeitos temporários	Cargas resultantes da Aplicação de freios, interrupção de geração (queda da rede), etc.
5. Impulsivas	Cargas que variam com o tempo (relativamente curto), mas de elevada magnitude	Pés de vento e tempestades súbitas. Cargas oriundas de descargas elétricas
6. Estocásticas	Cargas que variam com o tempo (cíclicas, transitórias e impulsivas)	Cargas nas pás devido a incidência de ventos turbulentos
7. Ressonantes induzidas	Cargas cíclicas resultantes da resposta dinâmica de algumas partes das turbinas	Instabilidades como o “flutter” (intermitência)

Fonte: adaptado de Wind Energy Handbook : BURTON, SHARPE, JENKINS, BOSSANYI; 2008

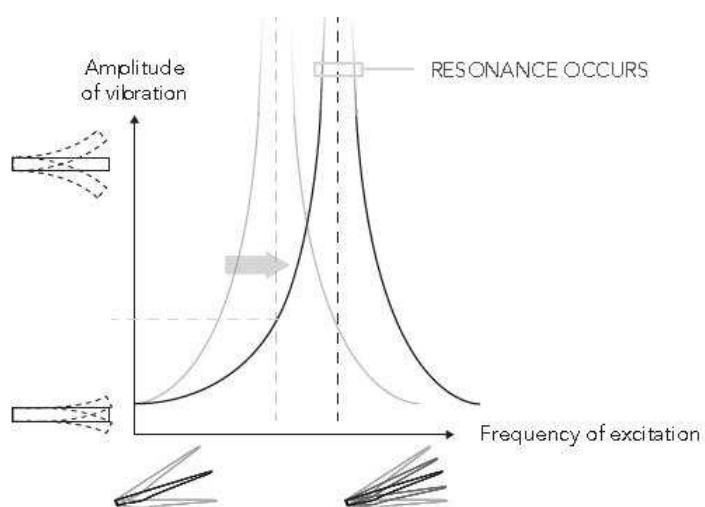


Figura 4.13: Vibração com aumento na rigidez da pá

Fonte: LEX PROJECT Handbook - Terms and Definitions – March 2016

4.6. FADIGA OPERACIONAL NAS PÁS EÓLICAS

Durante sua operação, as pás dos aerogeradores estão sujeitas a esforços diversos, mais substancialmente, tensões de cisalhamento que podem causar trincas horizontais bem como outros danos estruturais no laminado. A ação direta do vento também causa erosão nos bordos de ataque, conforme mostra esquematicamente a figura 4-12 abaixo:

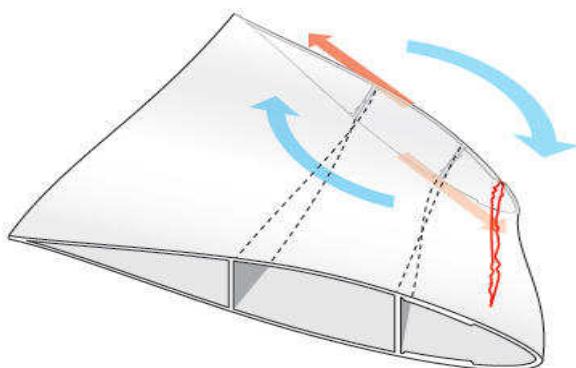


Figura 4.14: Esforços e Solicitações em uma Pá em Operação

Fonte: RATZ Handbook – 2016

As intensas forças laterais induzidas pelo vento, que atingem as pás na região da raiz quando em operação, resultam em deformações “fora-do-plano” nas lâminas curvas, fenômeno esse usualmente referido como similar ao movimento de bombear-respirar* (*fazendo-se uma analogia aos aparelhos respiratórios de hospitais, trata-se de movimento similar ao produzido por uma máquina de bombeamento pulmonar, por exemplo). Estas deformações resultam em curvaturas na área onde o bordo de fuga da pá está conectado na espessa secção cilíndrica da raiz da pá. De toda forma, trata-se de cenários de carga bastante complexos de serem analisados. (Ratz Project Report. – 2016)

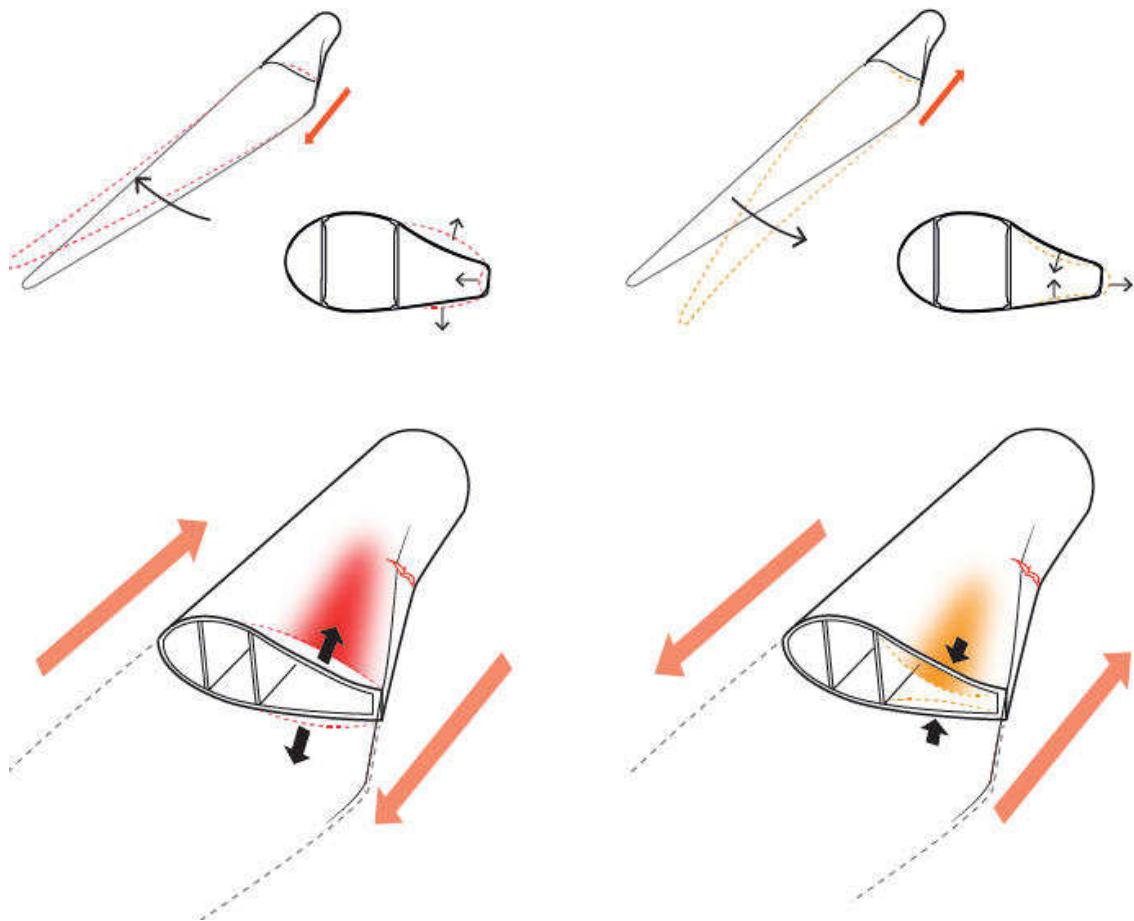


Figura 4.15: Esforços estruturais complexos atingem as pás eólicas quando em operação

Fonte: RATZ Technical Report – Denmark 2016

As figuras que abaixo se seguem, ilustram ainda de maneira mais detalhada as forças aerodinâmicas, de torção e contra torção, a qual as pás estão submetidas quando em operação.

FORÇAS AERODINÂMICAS

TORÇÃO

CONTRATORÇÃO

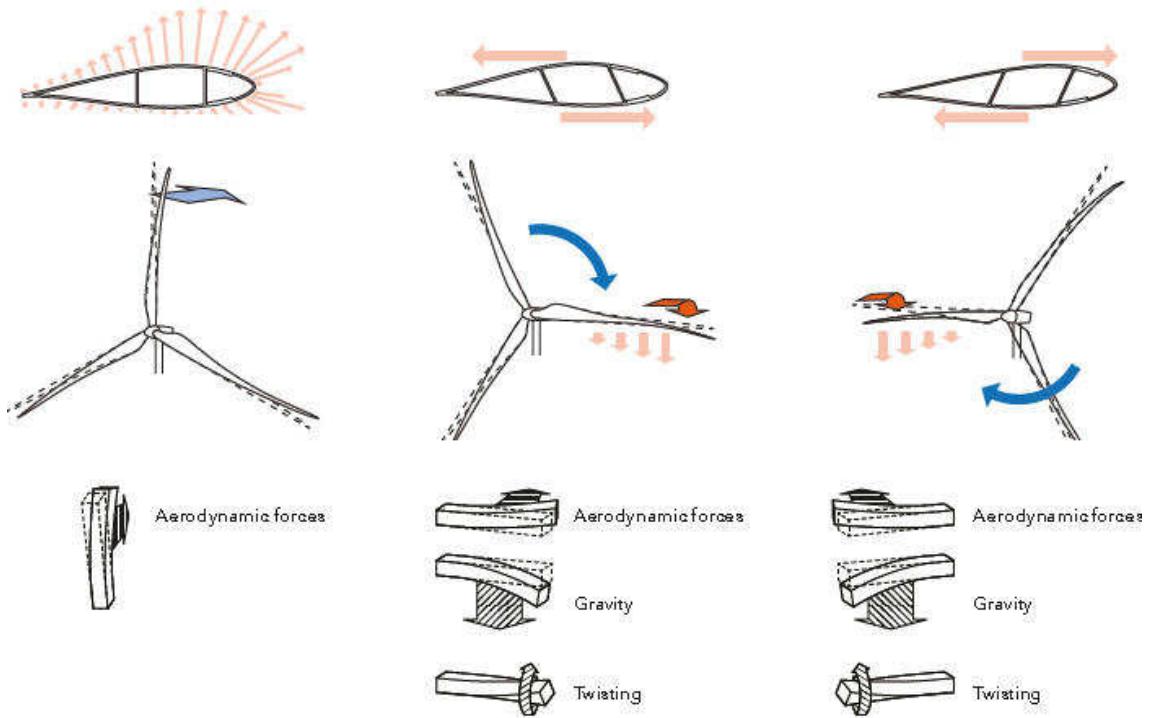


Figura 4.16: Forças Aerodinâmicas que atingem as pás quando em operação

Fonte: RATZ Technical Report –Denmark 2016

4.7. MATERIAIS DIVERSOS

Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em particular, pás rígidas poder ser fabricadas em madeira, alumínio, fibra de vidro, fibra de carbono e ou Kevlar, entre outros, ou uma combinação destes. Atualmente a maior barreira para a utilização dos compósitos é o alto custo para confecção dos moldes, que devem ser recuperados financeiramente ao longo de uma produção de cerca de 20 anos¹. Contudo, acredita-se que a crescente demanda por aerogeradores deverá reduzir gradativamente estes custos de fabricação.

- *Fibras de vidro*: Materiais compostos reforçados com fibra de vidro oferecem boas resistência específica e resistência à fadiga, bem como custos

¹ Segundo dados do segmento de manutenção eólico, existem hoje no mercado brasileiro mais de 40 tipos diferentes de turbinas em operação, sendo que o fator de capacidade (F_c) médio brasileiro está ao redor de 42,2%, o que já é cerca de duas vezes o (F_c) europeu. Isso significa dizer que para uma operação média anual de 74.000 horas, a vida útil esperada para esses aerogeradores no Brasil seria algo em torno de 11,1 anos ao invés de 20 anos. Estes valores têm se modificado na medida em novos dados estão surgindo no mercado.

competitivos para as pás. É o material utilizado em quase todas as pás dos aerogeradores dos parques eólicos da Califórnia (EUA), por exemplo, e já foi utilizado em rotores de até 78m de diâmetro. As pás em materiais compostos possibilitam uma geometria aerodinâmica lisa, contínua e precisa. As fibras são colocadas estruturalmente nas principais direções de propagação das tensões quando em operação, como visto anteriormente.



Figura 4.17: Fibras diversas aplicadas às pás

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

- Aço: Os aços estruturais são disponíveis a custo relativamente baixo no mercado interno de alguns países, e há bastante experiência na sua utilização em estruturas aeronáuticas de todos os tamanhos. No entanto, uma desvantagem do aço é que as pás nesse material tendem a ser pesadas, o que acarreta aumentos de peso e custo de toda a estrutura suporte. Pás de aço necessitam de proteção contra a corrosão, para a qual existem diversas alternativas possíveis.
- Madeira: Essa fibra natural, que também constitui um material composto, evoluiu ao longo de milhões de anos para suportar cargas de fadiga induzidas pelo vento, que tem muito em comum com aquelas a que são submetidos os rotores de aerogeradores. A madeira é amplamente utilizada no mundo para pás de rotores pequenos (até 10 m de diâmetro). O baixo peso da madeira é uma vantagem, mas deve-se cuidar para evitar variações do teor de umidade interna, o que pode causar degradação das propriedades mecânicas e variações dimensionais, que enfraquecem a estrutura das pás e podem causar rompimentos na estrutura.

- Madeira Balsa/Espuma: Material de enchimento colocado entre as camadas de tecido, que promove maior resistência à compressão, com a vantagem de possuir baixa densidade (não pesar na estrutura final). Outro fator importante é que existem canais ou sulcos entre os pedaços de balsa, o que promove o escoamento da resina no meio das camadas de tecido entrelaçadas, promovendo assim a aceleração intralaminar da resina e dando boa resistência estrutural.



Figura 4.18: Espumas estruturais e de enchimento

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

- Alumínio: a maior parte dos aerogeradores do tipo *Darrieus* usam pás feitas de ligas de alumínio extrudadas na forma de perfil aerodinâmico. Entretanto, ligas de alumínio não têm bom limite inferior de tensão de fadiga, e a medida que os ciclos de carregamento aumentam, falhas aparecem nessas pás. Este comportamento sempre tem levantado dúvidas quanto à possibilidade de se atingir cerca de 20 anos nestas condições.
- Fibra de carbono e/ou Kevlar: são materiais compostos mais avançados, que podem ser utilizados em áreas críticas (longarina da pá, por exemplo), para melhorar a rigidez da estrutura. Tem sido utilizado experimentalmente, mas tal material tem preços altos demais para serem utilizados nos aerogeradores economicamente mais competitivos. Uma das mais atrativas características desses materiais é a elevada razão resistência/peso. A fibra de carbono tem, por exemplo, a resistência específica cinco vezes maior que a do alumínio. (fonte: Barros, *Estudo Estrutural de Pás – Tese de Doutorado*)
- Desmoldantes: Os desmoldantes são desenvolvidos para promover uma camada base na superfície dos moldes, cuja principal finalidade é facilitar o processo de desmoldagem das lâminas macho e fêmea, que após saírem dos

moldes serão unidas através de um processo de colagem e selagem. Possui a vantagem de ser quimicamente desenvolvido para não atacar o elemento selador e o elemento limpador, tampouco fosquear a superfície dos moldes. Em alguns casos, com apenas uma aplicação, consegue-se desmoldar entre 05 e 08 peças por molde, sem ter de se repetir o processo de aplicação do desmoldante. Contudo, é muito importante que se aplique o elemento limpador antes de se aplicar o elemento desmoldante. Nos casos dos moldes que necessitam de reparo, deve-se aplicar o limpador, depois o selador, para aí então se aplicar o desmoldante. (fonte e cortesia: LOCTITE)



Figura 4.19: Desmoldante Loctite Frekote 770 – NC

Fonte:Loctite

- Resina Epóxi: são polímeros caracterizados pela presença de dois anéis de três membros, conhecidos como epóxi. A figura abaixo à direita mostra a estrutura molecular característica de um polímero termorrígido.

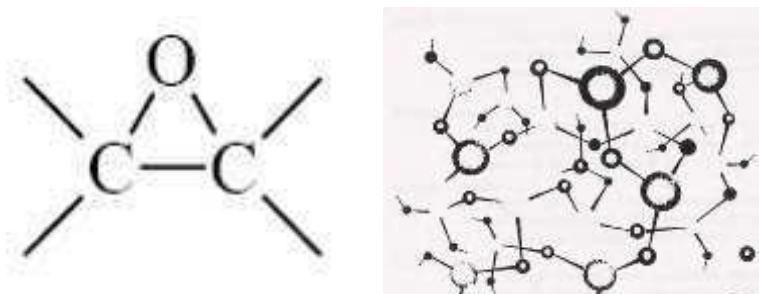


Figura 4.20: Estrutura Molecular de um Polímero Termorrígido

Fonte: Barros, Estudo Estrutural de Pás – Tese de Doutorado

Trata-se de um plástico termofixo que endurece quando se mistura com um agente catalisador ou "endurecedor". Existem hoje diversas empresas no mundo que se especializaram em formular produtos com características próprias para cada

necessidade do usuário. Os agentes de cura mais comuns são as poliamidas, poliaminoamidas, aminas alifáticas, aminas ciclo-alifáticas, aminas aromáticas, adutos de aminas, anidridos, polimercaptanas e polissulfetos. (*Barros, Estudo Estrutural de Pás – Tese de Doutorado*)

- Resina Poliéster: Trata-se de um composto orgânico derivado do petróleo, que passa de um estado líquido para seu estado sólido através de um processo químico chamado polimerização, usada para laminar alguns componentes que não possuem função estrutural.²

Não obstante, a grande maioria das pás eólicas e de alguns dos outros componentes da turbina eólica já são fabricados localmente com materiais compósitos poliméricos, muitos deles produzidos em fábricas e processos nacionais, tais como materiais e compósitos de madeira balsa, espuma de policloreto de vinila (PVC), fibras de carbono e de vidro, entre outros, conforme já citado.

Atualmente, a indústria de energia eólica, mais especificamente os fabricantes de pás estabelecidos no Brasil, conforme mostrado na (fig. 4-17), buscam melhoria contínua no desempenho destas caras estruturas, nos seus custos de manufatura, transporte, logística e nas propriedades dos materiais empregados como componentes.

² NOTA do autor: no caso da fabricação das pás, a LM se utiliza de resina POLIESTER e as demais TECSIS, WOBBEN e AERIS se utilizam de resina EPÓXI. Os moldes, contudo, ainda permanecem, na sua maioria, importados. No caso da Wobben e Tecsis, muitos dos moldes já são feitos localmente.



Figura 4.21: Fabricantes de Pás estabelecidos no Brasil e local de suas plantas

Fonte: MDIC – Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil, 2014³

Relativo aos fabricantes de turbinas, as chamadas OEMs, temos hoje atuando no Brasil os seguintes players: 1-) Alstom; 2-) Acciona; 3-) Gamesa; 4-) GE Energy; 5-) Siemens; 6-) Suzlon Energia Eólica do Brasil da India; 7-) Vestas do Brasil Energia Eólica, Dinamarca; 8-) WEG Equipamentos Elétricos S.A, 9-) Wobben Windpower Indústria e Comércio Ltda, 10-) Nordex, lembrando que recentemente ocorreu a fusão entre Siemens+Gamesa e entre GE+Alstom, bem como Nordex+Acciona, diminuindo com isso para um total de 7 grandes players instalados e fornecendo aerogeradores no Brasil.

³ Nota: em outubro de 2016 a Norte Americana GE anunciou a aquisição da LM Wind Power, fabricante Dinamarquesa de pás e a maior do mercado, por cerca de US\$ 1.65 Bilhões.

5. PANORAMA GERAL SOBRE OS TIPOS DE DANOS, DEFEITOS E FALHAS ENCONTRADOS NAS PÁS DE AEROGERADORES

O Brasil, com seus atuais cerca de 10.500 KW de potência eólica instalada, ainda é considerado um país novato neste mercado. Dados mais recentes mostram que cerca de 8000 turbinas de variadas potências instaladas e mais de 24.000 pás estão hoje em operação em diversos estágios de senioridade e distribuídas em diversas regiões do país, predominantemente Nordeste e Sul. Adicionalmente, se conseguirmos superar as barreiras e desafios da infraestrutura e de fato atingirmos as projeções de se instalar cerca de mais (dez) +10 GW até meados de 2022, teremos um substancial incremento a essa capacidade instalada. Naturalmente, tal cenário somente deverá ocorrer se a economia brasileira voltar a crescer de forma sustentada para a demanda firme de energia elétrica. Isso significa dizer que teríamos acumulado mais de (quarenta mil) 40.000 pás em operação requerendo algum tipo de manutenção periódica para o seu funcionamento regular, o que certamente demandará serviços e mão de obra cada vez mais especializada.

De todas maneiras, alguns danos inevitavelmente acontecem durante a vida útil do aerogerador, porém, quando detectados no início, a extensão e complexidade dos reparos em pás são de certa forma previsíveis e gerenciáveis. A curva 5-1 abaixo mostra o fator de capacidade médio associado à vida útil esperada para os aerogeradores brasileiros:

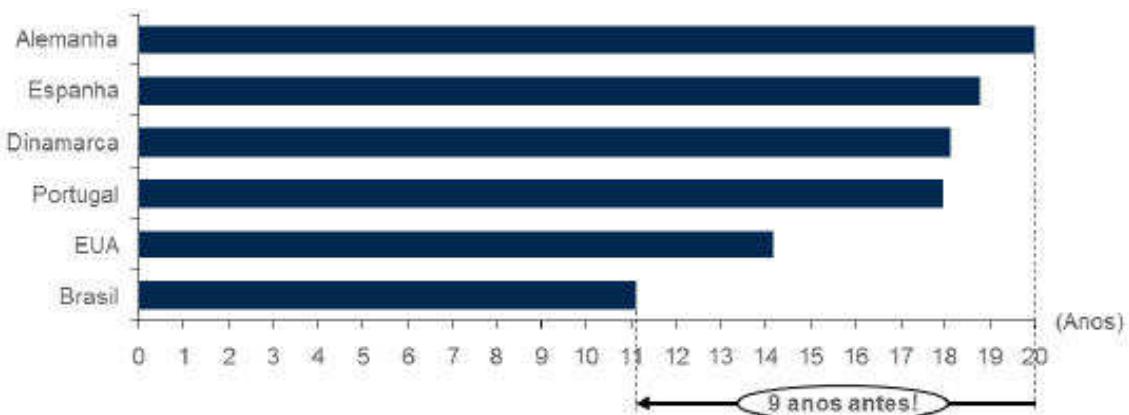


Gráfico 5.1: O Fator de Capacidade acelera a vida útil dos aerogeradores

Fonte: MAKE Consulting, 2015

Tabela 5.1: O Mercado Brasileiro – Vida útil esperada em função do Fc

	Num. Hs em operação (20 anos)	Fator de Capacidade (Fc) Médio	Vida Útil esperada (anos)
Alemanha	41.000	23.4%	20.0
Espanha	42.500	24.3%	19.3
Dinamarca	44.000	25.1%	18.6
Portugal	44.500	25.4%	18.4
Brasil	74.000	42.2%	11.1

Fonte: MAKE Consulting, 2015

No Brasil, existem parques eólicos instalados no Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia e Pernambuco que superam anualmente os 50% de Fator de Capacidade. Também o Piauí começa a aparecer com fatores altíssimos.

O problema que os fabricantes internacionais de aerogeradores estão tendo de enfrentar, é que o vento sopra de forma distinta no Brasil quando comparado aos locais para onde os aerogeradores foram originalmente projetados, tal como países da Europa e o próprio USA. Diferente das condições europeias e norteamericanas, onde há muita variação, com ventos multidirecionais, os ventos nordestinos são de excelente qualidade, sopram em velocidades altas por longos períodos, com baixa turbulência e pouca variação de direção, além de não haver ocorrência de furacões, tornados e ciclones. Esta característica oportuniza o desenvolvimento de aerogeradores específicos para esta condição, que já vem sendo chamada por alguns especialistas de “Classe Brasil” (RECHARGE, 2014). O fato de no Brasil possuirmos ventos mais fortes e constantes, mais quentes e mais úmidos, faz com que as turbinas no Brasil desenvolvam quase o dobro em número de revoluções a cada ano, e, portanto, são mais solicitadas e geram uma quantidade de energia bastante superior, quando comparadas às mesmas máquinas instaladas na Europa, por exemplo. Por esta razão, produzem maior quantidade de energia em menor quantidade de anos e desta forma, ficam muito mais suscetíveis ao desgaste de seus componentes internos e externos, tal como nas pás, foco deste trabalho. Ainda, é de suma importância mencionar, que o Brasil enfrenta desafios muito particulares e importantes para os serviços de manutenção, entre os quais podemos destacar:

- I. Na atual situação de infraestrutura do país, ainda existe uma longa distância entre os grandes centros reparadores e os locais aonde estão instalados os parques, o que dificulta o acesso dos equipamentos e da logística.
- II. As condições dos ventos existentes no Brasil dificultam e intensificam a necessidade de manutenção nos aerogeradores, e por isso mesmo, a mão de obra se torna escassa e muito requerida, o que abre um novo campo de oportunidades para novos profissionais capacitados no futuro próximo.
- III. Existe hoje baixa disponibilidade de guindastes elevatórios na região Nordeste e no interior dos estados impactados, tais como Bahia, Ceará, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul e Piauí, de forma a poder reparar ou substituir prontamente grandes componentes a grandes alturas (acima de 90 metros), aonde hoje predominantemente se concentram a maioria dos aerogeradores.
- IV. A manutenção com mão de obra especializada se torna bastante difícil e onerosa nos locais remotos aonde se localizam os parques, pois técnicos especializados para esse fim são difíceis de se treinar, reter e contentar por parte das empresas prestadoras de serviço. Além das enormes distâncias a serem percorridas pelo Brasil, tanto via aérea como terrestre, os locais em questão possuem limitada infraestrutura. Isso causa estresse e relativo descontentamento em muitos dos colaboradores.
- V. A manutenção em corda e rapel não possui boa eficiência e o rendimento e recursos dos inspetores se torna limitada, face as condições físicas de trabalho que encontram.
- VI. Ainda, independentemente das pás que são o foco deste trabalho, devido à alta exposição à salinidade e maresia dos parques mais próximos à faixa litorânea, podem ocorrer falhas diversas nos sistemas e componentes elétricos, de controle de yaw, também devido à unilateralidade dos ventos nordestinos, principalmente.
- VII. Pelo fato de nossos parques serem ainda muitos novos, ainda não temos a exata noção dos tipos e quantidades de problemas que poderão ocorrer nos próximos dez anos.

No que diz respeito aos fatores anteriormente mencionados, que caracterizam os ventos brasileiros interferirem na durabilidade e ciclo de vida

programado de uma turbina em operação, podemos inferir que se a mesma máquina está trabalhando por períodos mais longos, sob condições de esforços mais severos e contínuos, tal como no Nordeste brasileiro, todos os seus principais componentes móveis e de estabilização estrutural deverão se desgastar e envelhecer mais rapidamente quando comparados aqueles similares, porém trabalhando em condições mais amenas de vento e de menor desgaste.

Segundo informa o Engenheiro – Especialista Anthony Rowell, (*Entrevista em Setembro de 2016 sobre esse tema com Antony Rowell – Proprietário da ISL Wind e Especialista com mais de 15 anos de experiência em manutenção de turbinas eólicas no Reino Unido, Irlanda, Europa e USA – <http://www.stainlesssturbines.com/>* “as OEMs conhecem muito bem as condições do vento existentes no Brasil. No entanto, somente fazem pequenos ajustes nas máquinas existentes em seu portfólio de produtos, sem que haja um dimensionamento customizado, para então montá-las no país de destino. Contudo, se o Brasil realmente se voltar para uma verdadeira chamada às renováveis, o que significaria dizer ter um volume de geração eólica acima dos 300GW, e assim o dizem as próprias OEMs, então aí sim, eu tenho certeza que vamos começar a ver os componentes internos e externos das turbinas destes fabricantes serem desenvolvidos e desenhados exclusivamente para as condições de vento brasileiras, e desta forma atingindo talvez, o seu limite máximo de projeto”.

De forma análoga, o Especialista e ex-CEO da fabricante de pás eólicas TECSIS, o Engenheiro Aeronáutico pelo Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Bento Koike, assim como o Professor do FRAUHOFER INSTITUT da Alemanha, Andreas Reuter, confirmam em entrevista sobre o assunto, que: “os ventos no Brasil possuem condições muito particulares e especiais, diferentes das outras partes do mundo, sendo bastante intensos e estáveis. Por isso, a maioria das turbinas atualmente em funcionamento no Brasil não foram desenhadas para essas condições de vento”. (WINDENERGIE)

Normalmente, durante a negociação de compra e posteriormente na entrega de um parque eólico, o fabricante das máquinas ou OEM prevê nos contratos um período de garantia, normalmente de 02 anos máximo após o comissionamento da máquina, no qual o aerogerador está coberto de qualquer falha que porventura ocorra quando em funcionamento, logicamente desde que respeitados os parâmetros normais de operação e manutenção mínima requeridos. Após esse período, no

entanto, ocorre a chamada “inspeção de entrega”, evento após o qual a responsabilidade pela manutenção fica por conta de o proprietário do parque escolher em estender o atual serviço contratado, mediante um novo contrato de manutenção e serviços com a mesma OEM fornecedora das turbinas instaladas, ou então fazê-lo, a partir deste ponto, com um terceiro, a ser definido por sua conta e risco, geralmente em um contrato de longo prazo. Contudo, no Brasil, até o final de 2015, cerca de 65% de todos os aerogeradores instalados no país ainda se encontravam em período de garantia junto às OEMs. Isso significa dizer, também pelo fato de os financiamentos do BNDES junto às OEMs serem de até 10 anos, que os contratos de O&M de longo prazo de manutenção e serviços (nota do autor: O&M aqui significa Operação e Manutenção, diferentemente de OEM que significa “Original Equipment Manufacturer”), dificulta a entrada de provedores independentes destes serviços, os chamados ISPs, “*Independent Service Providers*”, mercado que deverá se desenvolver bastante no Brasil no futuro próximo. Segundo estima a Consultoria Especializada no setor Eólico e Solar – *MAKE Consulting*, o segmento de O&M – Operação e Manutenção, deverá crescer mais de cinco vezes nos próximos dez anos, trazendo com isso diversas novas oportunidades de negócios afins.

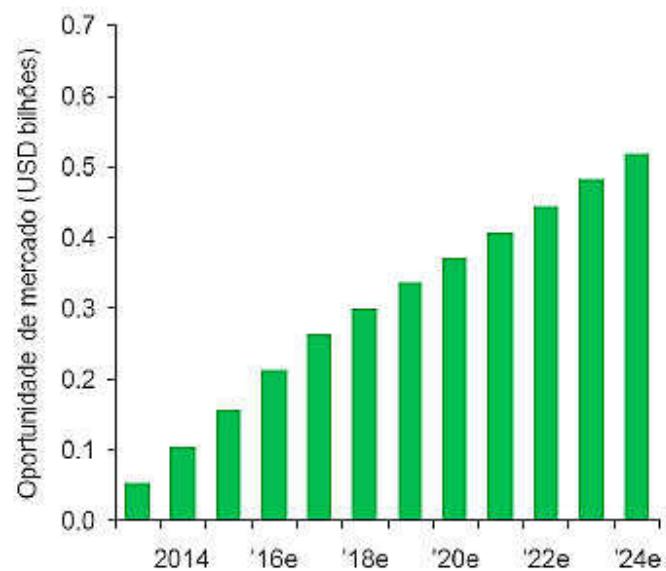


Gráfico 5.2: Crescimento estimado para o mercado de Operação & Manutenção no Brasil 2013-2024

Fonte: *MAKE Consulting*, 2016 – Brian Gaylord

Em contrapartida, a indústria eólica europeia e norte americana por exemplo, se encontra em um grau de maturidade muito mais desenvolvido quando comparado aos nossos padrões, e pelo fato dessas turbinas já terem atingido

senioridade que requer maior atenção, estão atualmente enfrentando um grande desafio em relação aos custos de operação e manutenção. Uma das principais áreas de interesse é a das pás, especialmente para turbinas instaladas offshore, o que ainda não acontece aqui no Brasil, uma vez que em nossos parques as turbinas em operação estão instaladas em terra, além de serem relativamente novas como já mencionado. O quadro 5-3 mostra a distribuição da altura das aerogeradores dos parques nacionais:

Tabela 5.2: Dispersão na altura das torres instaladas no Brasil

ALTURA DAS TORRES (em Metros)	DISTRIBUIÇÃO DAS ALTURAS
50m A 60m	1% a 2%
80m a 100m	80% a 95%
Maior do que 100m	Menos de 3%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5.3: Tipos, altura das torres e comprimento das pás dos aerogeradores nacionais

Fabricante	Aero gerador 2009	Pas	Torres	Aero gerador 2015+	Pas	Torres
Acciona	n/d	-	-	AW3000 125	61-m	120-m
Alstom	ECO80	39-m	80-m	ECO122	60-m	89-m
Gamesa	G87	43-m	78-m	G114	55-m	93-m
GE	1.6 XLE	40-m	80-m	2.2-107	52-m	80-m
Vestas	V82	40-m	80-m	V110	54-m	95-m
WEG	n/d	-	-	NPS 2.1-110	53-m	120-m
Wobben	E-82	39-m	108-m	E-92	44-m	108-m

Fonte: MAKE Consulting

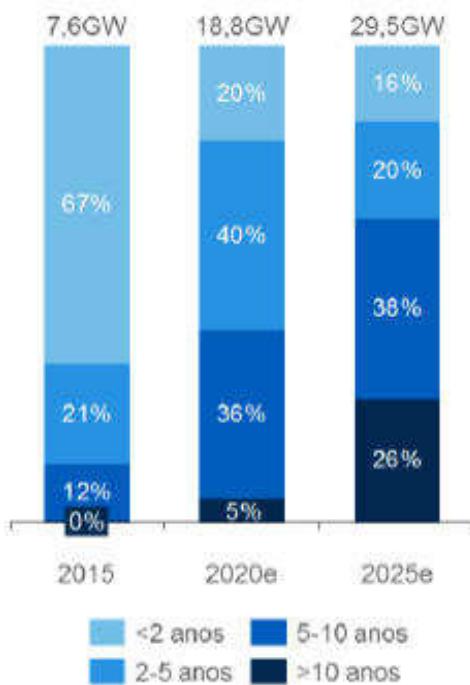


Gráfico 5.3: Idade e potência acumulada instalada dos aerogeradores existentes nos parques nacionais

Fonte: MAKE Consulting

Durante inspeções regulares na Europa, tem se notado que mais e mais danos são vistos em pás de turbinas eólicas em operação. Eles variam em tamanho, posição, tipo e localização do parque, assim como de tipo de turbina para tipo de turbina instalada. Algumas entidades e organizações europeias já iniciaram o processo de categorização de danos nas pás em operação, mais especificamente com objetivo de dividi-los em grupos relevantes, uma vez que é de fundamental importância termos uma compreensão clara dos danos nas pás observados no campo, também associado à sua localização geomorfológica. Esses dados sobre a gravidade dos danos, sua localização, seu tamanho, condições climáticas, do terreno em que estão localizadas, etc., podem ser usados futuramente, a partir do momento que estiverem sendo coletados e consolidados no Brasil, para se construir estatísticas relevantes que, em conjunto com um sistema de vigilância a ser desenvolvido, em última instância, pode ajudar a reduzir o custo nivelado da energia produzida, custo de manutenção e tempo de inatividade das máquinas instaladas (*LCOE – Levelised Cost of Energy*), com objetivo de ajudar a reduzir o custo total da energia.

$$LCOE = \frac{CAPEX + OPEX}{AEP}$$

Equação 5.1

Onde:

LCOE = custo nivelado da energia (R\$ / MWh)

CAPEX = Dispêndio de capital para instalação do projeto (R\$), incluindo-se Turbinas, Fundações, Infraestrutura Elétrica, Montagem e Instalações, etc.

OPEX = Custo de Operação e Manutenção do Parque (R\$ / ano)

AEP = Produção anual de energia do parque (MWh)

5.1. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE PÁS

Seria impossível tratar de falhas em pás eólicas sem se conhecer, mesmo que sumariamente, seus processos de fabricação associados. Resumidamente, os processos envolvidos na fabricação de uma pá eólica podem ser agrupados conforme abaixo:

a. Fabricação e preparação do molde



Figura 5.1: Ilustração de preparação de moldes para pás

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

b. Colocação dos materiais: (Desmoldante, Fibras, Reforços, etc. conforme a fig. abaixo e como vimos anteriormente)

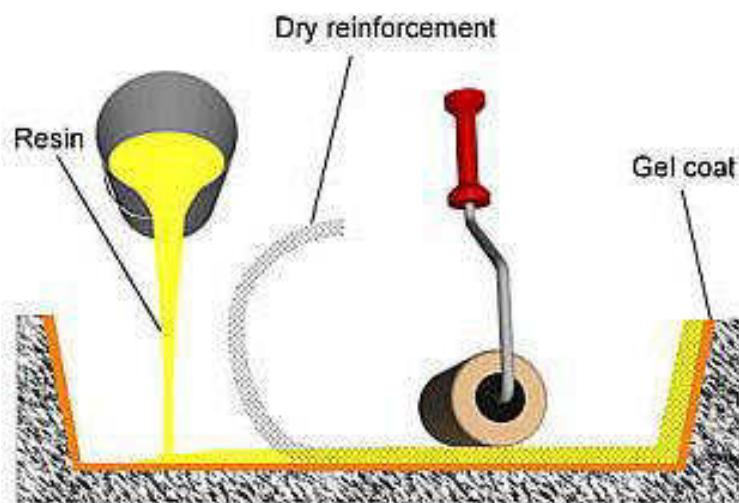


Figura 5.2: Ilustração esquemática de um molde

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

c. Fechamento do Molde



Figura 5.3: Fechamento de um molde de infusão

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

d. Infusão: (VARTM – Vacuum Assisted Resin Transfer Molding)

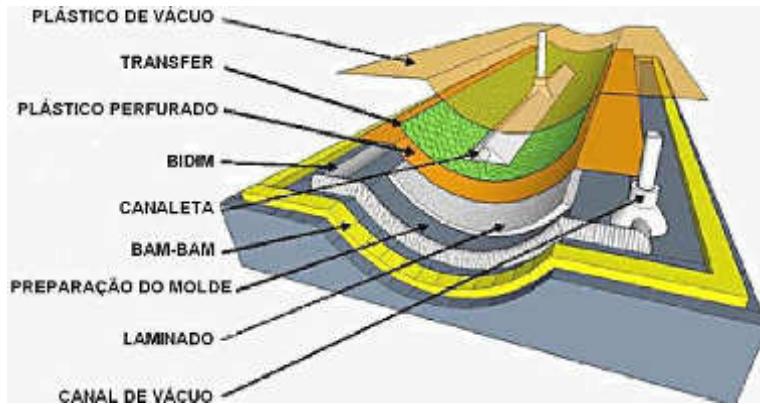


Figura 5.4: Ilustração esquemática de um molde de infusão

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

e. Desmoldagem, Colagem e Acabamento



Figura 5.5: Operação de acabamento em pás

Fonte: AERIS Service

- f. Testes de homologação: todo novo projeto de pá eólica deve passar por todos os testes internos no próprio fabricante, entre eles DV – *Design Verification* ou verificação do desenho e PV – *Process Verification Tests*, testes de verificação dos processos construtivos associados à fabricação dos aerogeradores, além de ter de ser homologados por organismo certificador independente antes de ser produzido em escala. Algumas organizações prestam esse tipo de serviço, entre elas: i-) Det Norske Veritas, DNV GL Bureau Veritas, credenciado pelo DANEK(7031 e 9089) na Dinamarca, e outras entidades na Alemanha: ii-) Germanischer Lloyd Industrial GmbH, certificado pelo DKD (D-ZE-11053-01-00) e iii-) KEMA Zertifizierungsgesellschaft GmbH, também credenciado

pelo DKD (D-E-17287-0101), bem como outras entidades de renome na Espanha, Inglaterra, etc.

g. Normas e orientações relacionadas a homologação de turbinas e pás:

- I. DNV GL Documentos de serviço para “Renewables Certification” DNVGL-SE-0073 (dezembro de 2014) ➔ Certificação de projetos de parques eólicos de acordo com IEC 61400-22 – especificação dos serviços da DNV GL para a certificação de parques eólicos onshore e offshore de acordo com IEC 61400-22;
- II. DNVGL-SE-0074 (dezembro de 2014) Certificação dos tipos e dos componentes de turbinas eólicas de acordo com IEC 61400-22. Especificação dos serviços da DNV GL para o tipo e a certificação de componentes de turbinas eólicas de acordo com IEC 61400-22;
- III. DNVGL-SE-0077 (março de 2015) Certificação de sistemas de proteção contra incêndios para turbinas eólicas. Especificação mínima para tipos definidos de turbinas eólicas;
- IV. DNV-OS-J103 (JUNHO DE 2013) Projeto de estruturas de turbina eólica flutuante ➔ Princípios, requisitos técnicos e orientações para a concepção, construção e serviço de inspeção de estruturas de turbinas eólicas flutuantes;
- V. DNV-OS-J101 (maio de 2014): Projeto de Estruturas Offshore vento de turbina ➔ trata dos princípios, requisitos técnicos e orientações para as estruturas de turbina eólica offshore e abordagem de ciclo de vida conforme design das pás;
- VI. DNV-DS-J102 (outubro de 2010) Design e fabricação de pás para turbinas eólicas offshore e onshore, Turbinas de vento ➔ Interpretação detalhada dos requisitos básicos para as lâminas, incluindo design, fabricação e testes;
- VII. DNV-OS-J201 (novembro de 2013) Guia geral para parques eólicos Offshore ➔ Padrão definindo projeto, layout e as operações de subestações marítimas.



Figura 5.6: Centro de Testes de pás eólicas em Charlestown, Massachusetts

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016



Figura 5.7: Testes de pás eólicas

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

Acima, o recém-inaugurado Centro de Testes de pás eólicas em Charlestown, Massachusetts.



Figura 5.8: Testes em Pás Eólicas – cortesia LM Glasfiber

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

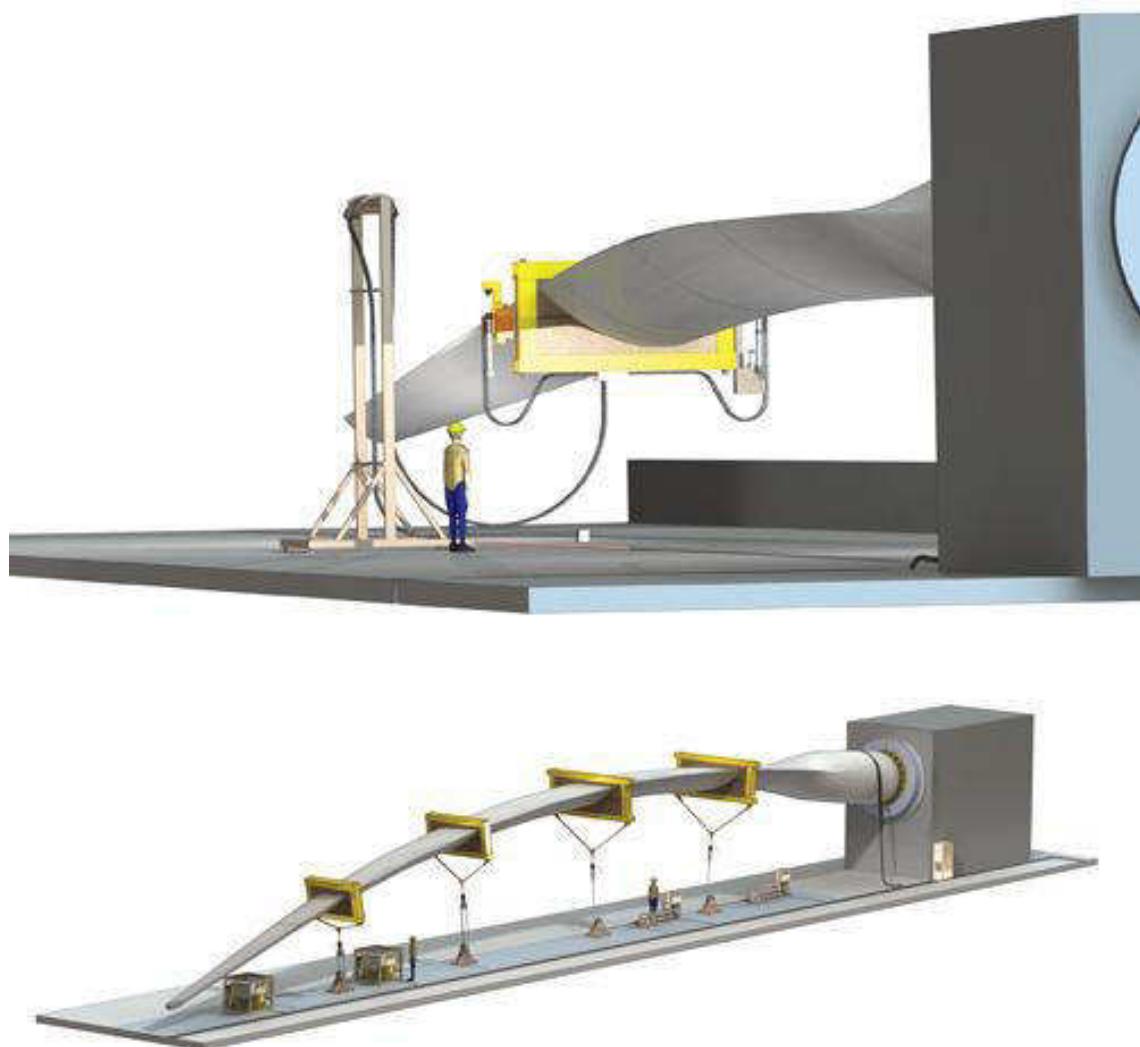


Figura 5.9: Ilustrações de dispositivos e bancadas de testes de verificação de desenho e processo DV (Design Verification Tests) e PV (Process Verification Tests)

Fonte: ITW – material apresentado e compartilhado durante o Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

O Brasil, através de sua iniciativa junto ao “*Programa Demonstrativo para Inovação na Cadeia Produtiva de Energia Eólica*”, demandado pelo MCTI – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação ao CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, cujas principais motivações são a melhoria do desempenho dos projetos eólicos implantados no País, tem por objetivo promover e acelerar o desenvolvimento tecnológico e o aumento do conhecimento na área de energia eólica no Brasil, além de contribuir para o crescimento do setor industrial eólico.

Neste sentido, utilizou-se de informações da cadeia produtiva brasileira e pesquisou a opinião dos especialistas em energia eólica na indústria, academia, governo e consultorias. Com base nestas informações, o projeto demonstrativo selecionado para ser o objeto trabalhado pelo estudo foi a criação de um centro nacional para desenvolvimento tecnológico em energia renovável, com foco inicial em tecnologia eólica. A proposta visa fortalecer a base científica e tecnológica nesta área, apoiar o desenvolvimento da indústria de equipamentos de geração de energia renovável no Brasil, e impulsionar o mercado de energia renovável, principalmente eólica e solar, com a realização de pesquisas e serviços especializados.

A nova organização, referida aqui como “*Instituto Tecnológico de Energia Renovável*” (INTER), será um centro de pesquisas com abrangência internacional, constituído de grupos de pesquisa, consultores, e um complexo de laboratórios capazes de realizar testes experimentais em equipamentos de geração de energia renovável, incluindo aerogeradores de grande porte e seus componentes, e de desenvolver e aplicar soluções e inovações para o mercado de energia renovável. Oxalá esta iniciativa realmente vingue.



Figura 5.10: Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada – Energ. Eólica
Fonte: Programa Demonstrativo para Inovação em Cadeia Produtiva selecionada – CGEE 2015

Nos últimos anos, muitos fabricantes de turbinas eólicas foram afetados por significativos problemas derivados do mau funcionamento ou problemas nas pás eólicas, que variam desde falhas catastróficas até amplas campanhas de *retrofit* e recuperação de pás (GRIFFIN & MALKIN). As consequências são tanto financeiras como relacionadas à segurança das turbinas: somente em 2009 por exemplo, um

grande fabricante de turbinas apresentou uma despesa de US \$ 100 milhões para a recuperação de pás * (**Press Release, Suzlon Energy Unlimited, Oct. 12, 2009*). Adicionalmente, falhas recentes em um projeto de energia eólica no sul da Califórnia levaram a necessidade de substituição de 100% das pás em + de 25 turbinas (*Monthly WINDPOWER Magazine – 15 fevereiro de 2010*). Problemas como estes têm contribuído para aumentar as percepções negativas sobre a eficácia da energia eólica como fonte segura de energia, tanto pelo lado financeiro como público, o que resultou em perdas comerciais substanciais, tanto para os fabricantes (OEMs), assim como para desenvolvedores de projetos / e proprietários.

5.2. NOMENCLATURA DOS DANOS

De acordo com organismos europeus atualmente trabalhando no segmento de manutenção e reparação de pás eólicas, os danos, ou defeitos, em si, podem ser priorizados considerando-se o impacto que têm sobre a própria pá e sobre o funcionamento da turbina eólica. Uma categorização sugerida pode ser:

- Danos Visuais (ou cosméticos). → Quando encontrado em um processo de inspeção regular, não há necessidade de uma ação imediata, somente seu acompanhamento.
- Dano relativamente baixo (não grave). → Reparação deve ser realizada durante a próxima inspeção prevista da turbina.
- Dano de risco elevado, porém sem a necessidade de parar a turbina. → Estes danos em particular, devem ser mantidos sob vigilância e reparados o mais rapidamente possível para evitar danos maiores no aerogerador. Esta categoria tem um risco elevado e que pode danificar outras áreas da pá.
- Danos muito graves. → Parada imediata do aerogerador é requerida e o dano deve ser reparado imediatamente.

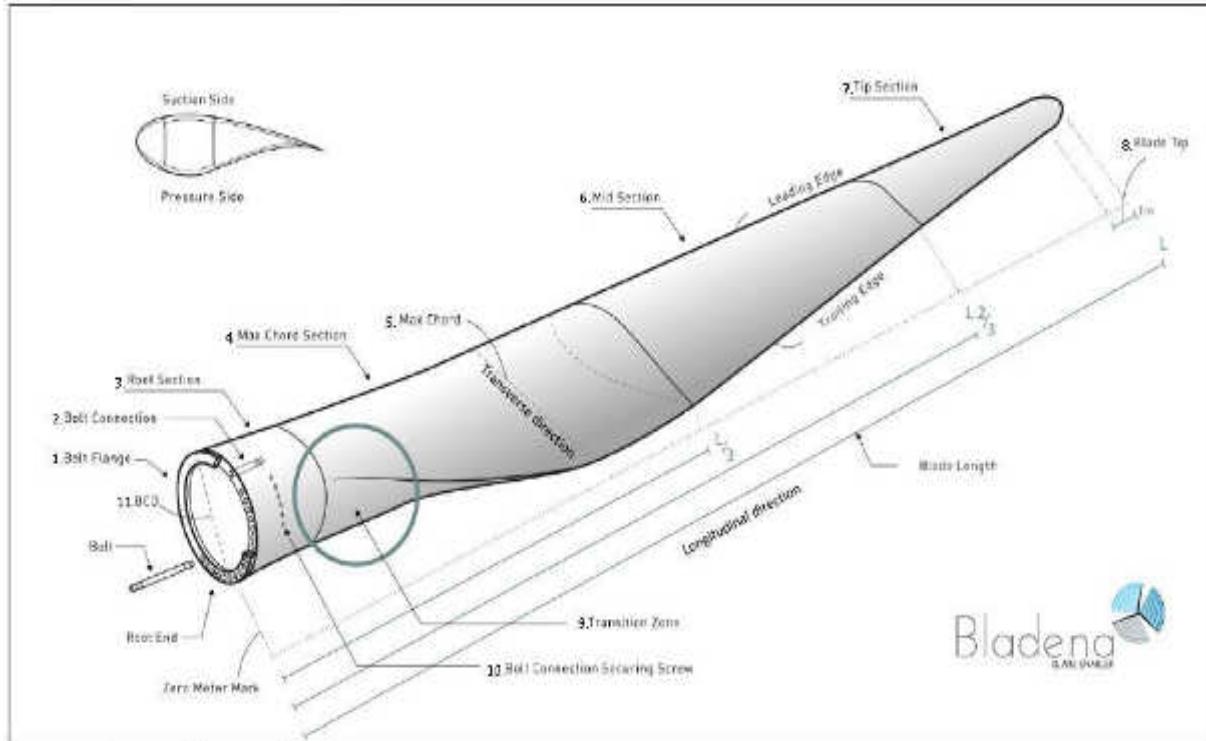


Figura 5.11: Nomenclatura dos elementos da pá

Fonte: Cortesia BLADENA – Mr.Find Mølholt Jensen

Elementos da Pá Eólica:⁴

1. Parafuso de Flange: flange de aço colocada na extremidade da raiz da pá, junto ao cubo.
2. Parafuso conector: Bucha de aço inserida na extremidade da raiz de forma circular, e utilizado como uma ligação roscada para os parafusos.
3. Secção da raiz: Secção cilíndrica da pá na extremidade da raiz para a ponta da lâmina.
4. Secção de corda máxima: Secção da pá entre a secção da raiz e a 1/3 do comprimento total da lâmina.
5. Corda máxima: A maior distância entre os dois extremos dos bordos de ataque e de fuga da pá, medida perpendicularmente a estes.
6. Secção do meio: é a secção da pá medida entre a secção de corda máxima e a 2/3 do comprimento total da pá.

⁴ A nomenclatura dos elementos da pá mostrada foi extraída do *BLADENA HANDBOOK* e tem por objetivo facilitar a compreensão para os tipos de falha classificados e que vamos examinar.

7. Secção da Ponta: é a secção da lâmina entre a secção do meio e a ponta da pá (*Blade Tip*).
8. Ponta da pá: trata-se da ponta da lâmina na direção oposta à da extremidade da raiz, definida no último metro da lâmina.
9. Zona de transição: área traseira plana, na junção entre a parte cilíndrica da pá e a parte chata do início da lâmina.

Danos e falhas nas pás podem ser inerentes aos processos de fabricação ou consequência de seu desgaste natural pela utilização ao longo do tempo, nas mais diversas condições de utilização, clima, intempéries diversas. Resumidamente, falhas podem ocorrer devido aos seguintes fatores, entre os quais:

- Baixa qualidade dos materiais utilizados
- Escolha errada dos materiais
- Especificações erradas
- Especificações não seguidas, mesmo sendo corretas
- Falhas na produção não detectadas, nem corrigidas
- Retrabalhos inadequados ou mal realizados
- Rachaduras estruturais não detectadas
- Outros defeitos de fabricação não corrigidos
- Superfícies das lâminas quebradas
- Outros diversos

A seguir passaremos a analisar as falhas existentes ao longo do ciclo de manufatura e ocorridas no campo, separadamente.

5.3. DEFEITOS DE FABRICAÇÃO

- a. Tecido seco: tecido sem resina após a cura no molde, ou com proporção de fibra/resina 10% acima do especificado.



Figura 5.12: Foto caracterizando tecido seco

Fonte: ITW – Conaend 2016

- b. Rachaduras e Trincas: aparece quando pequenos cortes ou divisões ocorrem no laminado ou na massa de colagem, que podem ser causados por danos mecânicos e também pelo processo de cura inadequado da massa de colagem.



Figura 5.13: Foto caracterizando rachaduras e trincas em uma pá

Fonte: ITW – Conaend 2016

- c. Reentrância ou sulco: significa uma negativa na junção das partes, que podem ser criadas pela formação de lacunas durante o processo de “*hand lay-up*” ou infusão, causando com isso depressões no laminado.

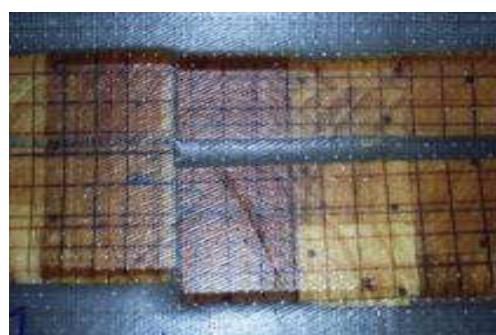


Figura 5.14: Foto caracterizando Reentrância ou Sulco em uma pá

Fonte: ITW – Conaend – 2016

d. Falhas no material de núcleo: Sabe-se que, por vezes, durante o processo de fabricação, não pode haver falhas na disposição e assentamento do material de núcleo. O composto acumulado (que ao final forma uma espécie de sanduíche, que teoricamente deve ser estável), normalmente é feito a partir de várias folhas ou camadas do material do núcleo. No caso de quando a madeira balsa é utilizada por exemplo, é difícil estabelecer uma ligação "perfeita" destas placas. A Figura x-x abaixo mostra um exemplo em que o material do núcleo (neste caso, a madeira balsa) foi deslocada após o processo de infusão.

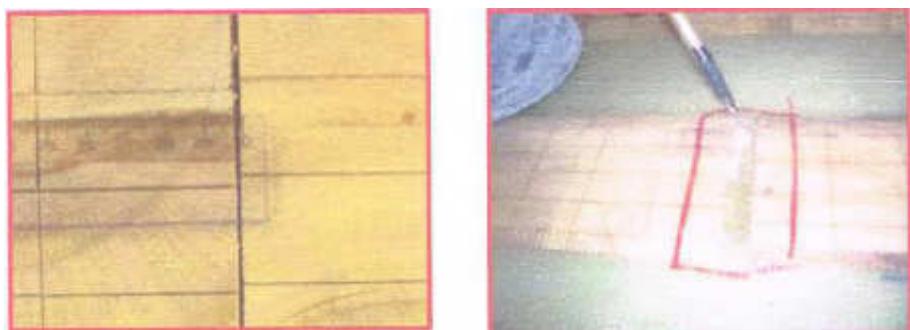


Figura 5.15: Deslocamento do material de núcleo após o processo de infusão

Fonte: ITW – Conaend – 2016

Além do mais, quando os painéis centrais se unem, um adesivo (normalmente resina) é utilizado. A área do material do núcleo, onde o processo de junção é realizado, pelo fato de estar deslocado, terá um comportamento estrutural diferente sob condições de operação, do que sob condições normais, onde a do núcleo do material "isotrópico" deveria estar. Durante o processo de fabricação, se o material do núcleo (madeira balsa, neste caso) foi dimensionada de forma incorreta, o núcleo irá requerer um retrabalho, o que na maioria dos casos é feito com uma faca, tal qual uma cirurgia humana. (Ver figura 5-12).



Figura 5.16: Procedimento "Cirúrgico" realizado a faca em uma pá, mostra um corte transversal nas camadas de fibra de vidro, o que fatalmente poderá levar a ocorrência de trincas transversais nesta área da pá eólica quando posta em operação.

Fonte: Bladena

- e. Delaminação: separação de duas camadas de tecido, seja nos processos de infusão ou “*hand lay up*”. Também poderá ocorrer na separação de duas superfícies durante a colagem.



Figura 5.17: Foto caracterizando uma Delaminação na pá

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- f. Bolhas: espaços vazios entre dois componentes presentes no laminado ou na massa de colagem.



Figura 5.18: Foto caracterizando pequenas Bolhas na pá

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- g. Superfície brilhante: área que está com a rugosidade inadequada para o processo de colagem posterior.
- h. Ponto branco: causado por erro durante o processo de infusão.



Figura 5.19: Foto caracterizando “Pontos Brancos” na pá

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- i. Falta de Compactação: laminados aplicados por HLU (processo de moldagem manual), onde as camadas não estão devidamente interligadas.



Figura 5.20: Foto caracterizando falta de compactação no laminado da pá

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- j. Tecidos dobrados: tecidos laminados onde ocorrem dobras e rugas.



Figura 5.21: Foto caracterizando tecido dobrado no fechamento

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- k. "Overbite": quando no fechamento das lâminas não temos o alinhamento das cascas, ocasionando diferenças entre o posicionamento destas.
- l. Falta de colagem e ponta quebrada:



Figura 5.22: Foto caracterizando falta de colagem e ponta quebrada em pá

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- m. Falha na massa:

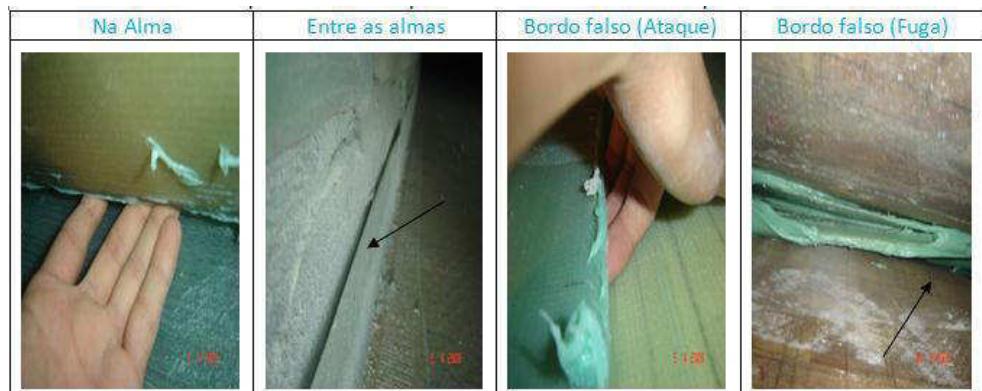


Figura 5.23: Fotos caracterizando falha de massa no processo de colagem

Fonte: ITW – Conaend – 2016

n. Outras fotos de falha na massa

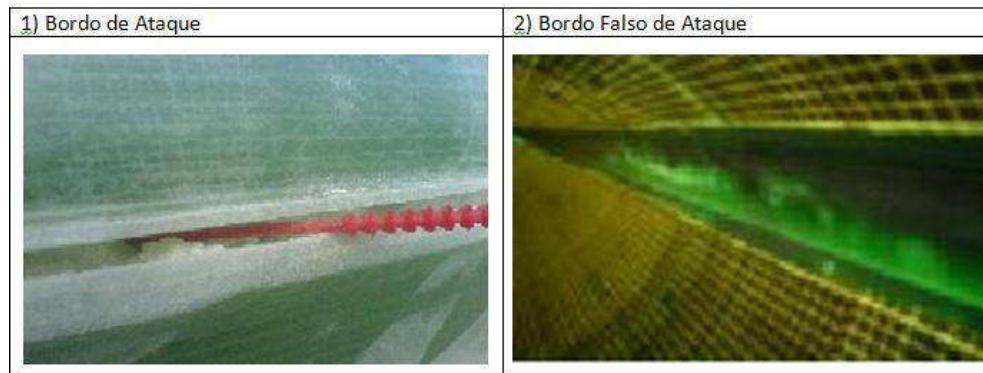


Figura 5.24: Fotos caracterizando falha de massa no processo de colagem

Fonte: ITW – Conaend – 2016

o. Ferrugem e desalinhamento



Figura 5.25: Foto caracterizando ferrugem e desalinhamento no molde

Fonte: ITW – Conaend – 2016



Figura 5.26: Foto caracterizando desalinhamento no molde

Fonte: ITW – Conaend – 2016

p. Presença de vazio



Figura 5.27: Foto caracterizando presença de vazios

Fonte: ITW – Conaend – 2016

q. Ruptura no laminado



Figura 5.28: Foto caracterizando a ruptura no laminado

Fonte: ITW – Conaend – 2016



Figura 5.29: Foto caracterizando a ruptura no laminado

Fonte: ITW – Conaend – 2016

- r. Rugas ou enrugamento superficial: decorre de uma falha estrutural nas camadas de fibra sobrepostas durante o processo de vacuumformagem no molde (ocorrência de “chupagem”). As rugas podem ser classificadas de acordo com sua condição superficial, entre rugas recuperáveis, as quais devem ser removidas tal qual um procedimento de remoção cirúrgica como já mencionado, e aquelas que não são recuperáveis, situação em que a corda da pá fica comprometida, colocando em risco a estabilidade estrutural caso posta em operação nestas condições, conforme mostra a figura 5.30 b-) abaixo:

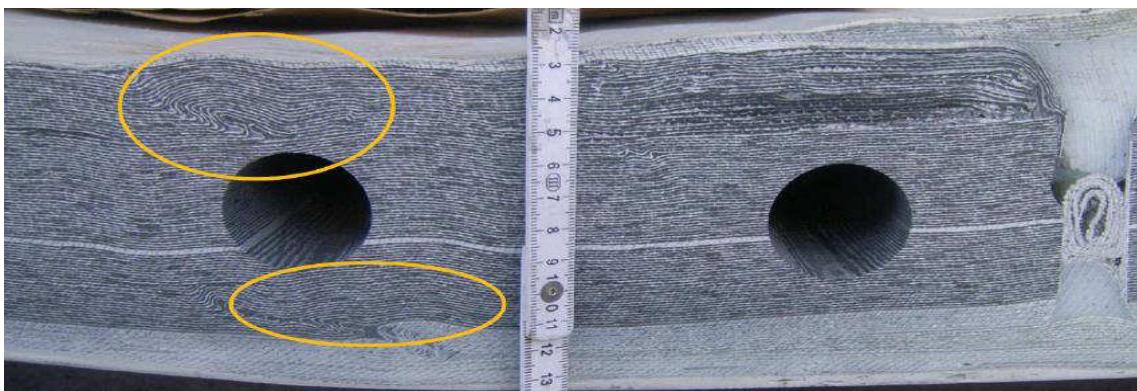


Figura 5.30: Foto em corte de um flange de pá de 55m de comprimento

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.31: Ruga

Esquerda: Ruga superficial reparável no espesso laminado da raiz da pá

Direita: Ruga irreparável na secção de corda máx. da pá (pá comprometida)

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

- s. Descolamento – Falha no Adesivo: O processo de descolamento se refere à situação em que as duas partes da lâmina unidas por materiais adesivos são separadas. A Figura 5.32 abaixo mostra uma das longarinas da turbina eólica ser separada da estrutura onde era para supostamente estar ligada. Neste

caso, esta é uma falha importante uma vez que a longarina é o principal componente estrutural que transporta as cargas na direção de movimentação rotacional, perpendicular o eixo de rotação da pá (movimento de controle de Pitch) – (“flapwise”).

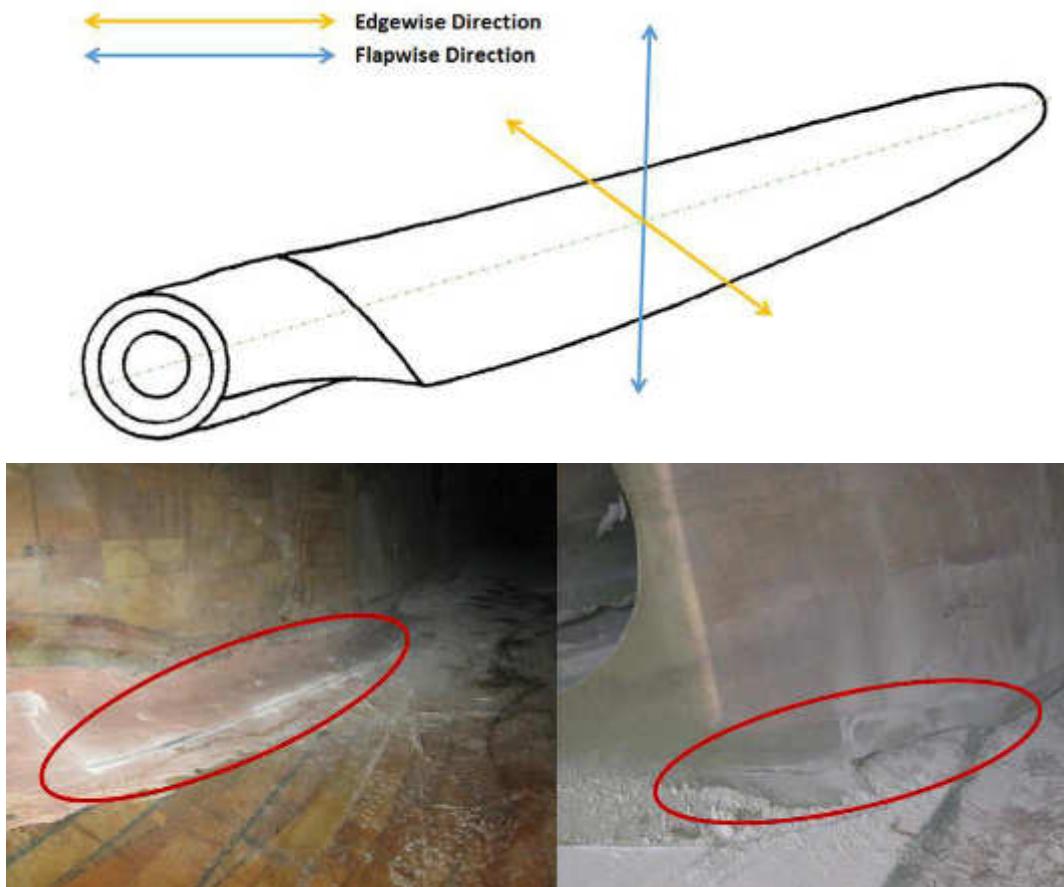


Figura 5.32: Descolamento da longarina dentro de uma pá

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

Por vezes, durante o processo de fabricação das pás, utiliza-se quantidade insuficiente de adesivo durante a colagem dos diferentes componentes. Isto pode levar a uma falha catastrófica, pois em muitos casos o sistema de suporte estrutural não é "conectado" adequadamente com a parte das cargas durante o funcionamento e operação das pás, que são as cascas ou conchas. A Figura 5-16 abaixo mostra um exemplo onde a falta de material adesivo é observada entre a caixa estrutural dentro da pá que recebe a carga e as cascas de formato aerodinâmico.



Figura 5.33: Falta de material adesivo entre a caixa estrutural e as cascas de formato aerodinâmico

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

- t. Retrabalhos: são muito comuns nestes processos manuais, e dependem basicamente das especificações técnicas, normas e procedimentos dos clientes finais (OEMs), para se definir os retrabalhos a serem realizados. (Exemplos nas 05 fotos abaixo)



Figura 5.34: Mostra retrabalho em estrutura interna de uma pá

Cortesia: ITW



Figura 5.35: Retrabalhos diversos em estrutura interna de pás

Cortesia ITW

5.4. DEFEITOS DE CAMPO

a. Erosão no bordo de ataque: nesta situação, erosão é a remoção da cobertura superficial protetiva existente nas pás: A erosão é um fenômeno físico específico para quaisquer materiais expostos aos elementos da natureza. Para o caso das pás eólicas, este fenômeno se torna ainda mais acelerado devido à rotação das pás em operação. Mesmo que as pás estejam protegidas com materiais de revestimento avançados e que sejam desenvolvidos pela indústria especializada contra a erosão, ainda assim estas falhas ocorrerão, uma vez que a intensidade variará caso a caso, conforme o local, condição do vento, intempéries em suspensão no ar, etc. Isto irá expor o laminado às duras condições ambientais de vento que tornam a lâmina mais vulnerável aos elementos de atrito. Este fenômeno é visto especialmente na ponta das pás onde a velocidade de ponta é extremamente alta, como vimos anteriormente, causando por isso mesmo intensa abrasão. Existem diferentes opções para se diminuir a erosão, quer através de fitas especiais, como a utilizada nas pás de helicópteros, ou ainda pintura especial. Este procedimento geralmente é utilizado na área de bordo de ataque das pás. No entanto, após um período relativamente curto de tempo, essa solução já se degrada como vemos nas figuras 5.36 a 5.43 abaixo:



Figura 5.36: Leading edge tape erosion

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.37: Leading edge tip erosion

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.38: Leading edge erosion

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.39: LE panel eroded

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.40: Erosão nos bordos de ataque

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.41: Caracterização de erosão nos bordos de ataque

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

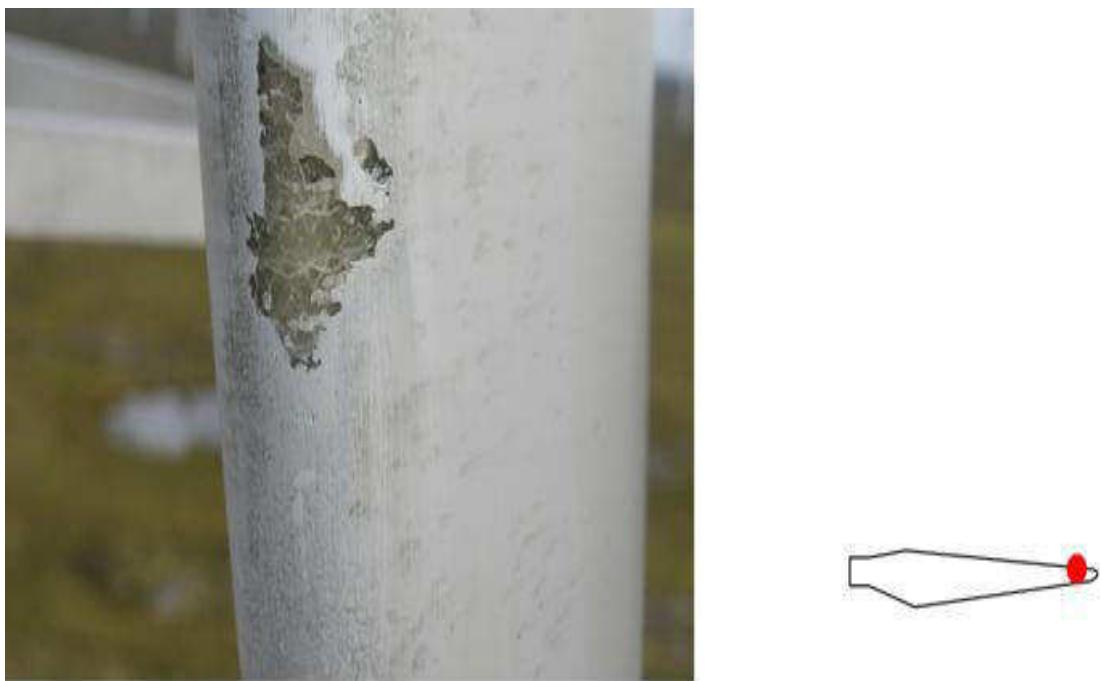


Figura 5.42: Descascamento de laminado (Epoxi)

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

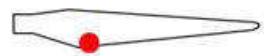


Figura 5.43: Bordo de ataque desgastado pela erosão

Fonte: Bladema Failure Catalog V2_8

- b. Descargas Elétricas por Raios: Aerogeradores e suas respectivas pás são atingidos por raios ao longo de sua vida e, por vezes, isso irá causar danos às pás que tem instalado um sistema de aterramento que leva as descargas para o chão. Na maioria dos casos, este sistema é formado por um condutor em cada pá e de vários receptores por pá. Dependendo da intensidade do raio e da descarga elétrica, os receptores e a área em torno dos receptores ficam submetidas a intensa energia e muitas vezes chamuscada e destruída. Na maioria dos casos, o raio atinge a ponta das pás, (fig.5-19). Mesmo com a proteção instalada, em muitos dos casos, a própria pá é afetada devido à alta intensidade das descargas. (Figura 3b e Figura 3c). Como o Brasil é o país aonde existe a maior quantidade de raios no mundo, cerca de 50.000 por ano (*fonte:grupostrom.com*), esse tipo de falha se torna ainda mais crítica e requer atenção especial, principalmente no sul do país, aonde tempestades ocorrem com maior frequência, especialmente nos meses que antecedem e após o verão, entre Out-Maio, podendo chegar a descarregar até 100 Milhões de Volts em uma só descarga.



Figura 5.44: Descarga Elética

Fonte: Climatempo



Figura 5.45: Ilustração de descargas elétricas entre Trópico e o Equador

Fonte: Climatempo



Figura 5.46: Bladetip stroke by lightning

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.47: Damaged blade tip due to lightning

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.48: Blade tip damaged by lightning

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.49: Pontas de Pás diversas que sofreram descargas elétricas

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

Para esta situação, muitas das pás já são projetadas com a ponta removível, justamente para se fazer a troca quando não vale mais a pena recuperá-las.

- c. Trincas e rachaduras estruturais: trincas podem ser divididas e oriundas dos processos de fabricação, como já visto, ou então devido a uma falha estrutural de projeto.

- d. Trincas Longitudinais são aquelas vistas no sentido de laminação da fibra, ou no sentido do raio da pá. Quando se refere às trincas, a erosão e o revestimento superficial não são levados em consideração. Uma rachadura ou trinca longitudinal pode aparecer como uma falha de revestimento. No entanto, quando observada de perto, uma trinca irá aparecer sob a forma de linhas finas ao longo da casca da pá.

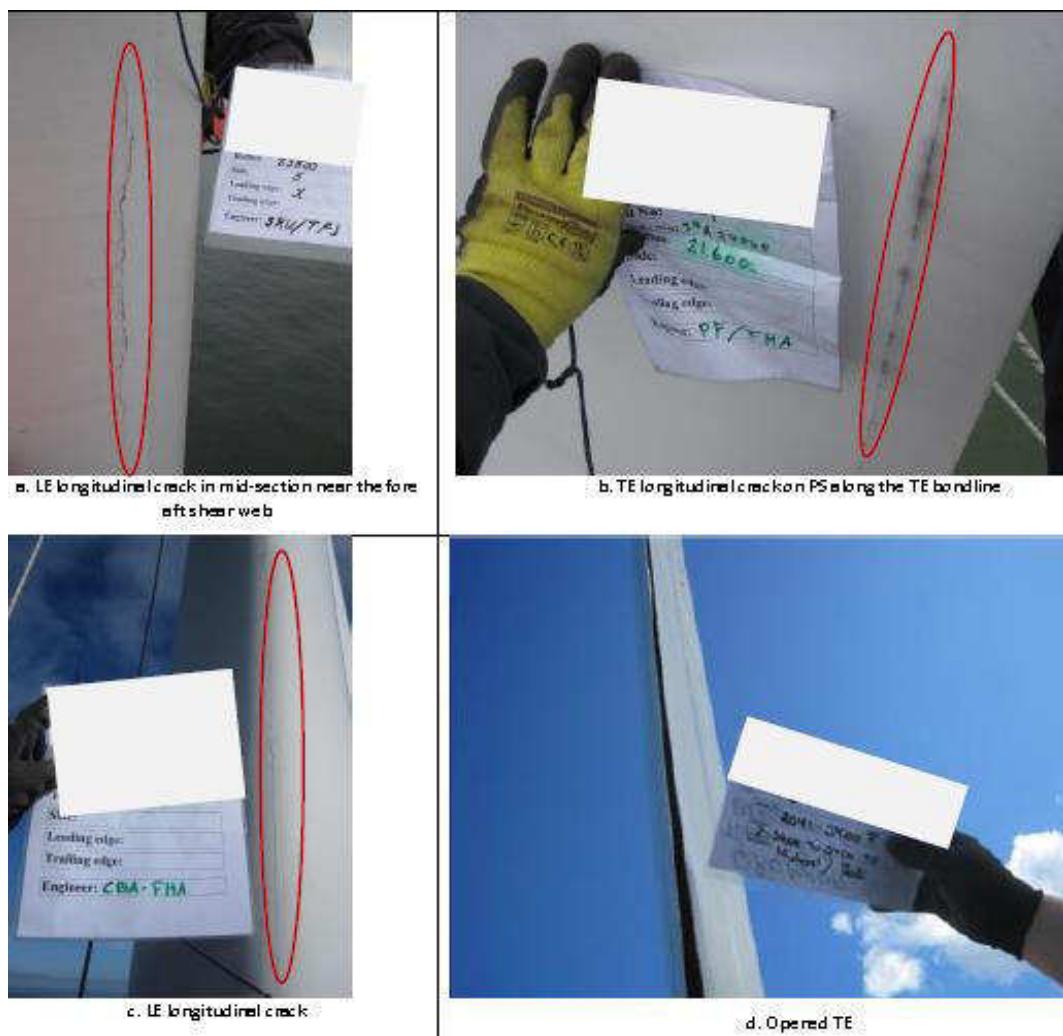


Figura 5.50: Fotos caracterizando trincas longitudinais

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

Muitas das trincas longitudinais podem ser encontradas ao longo do bordo de fuga das pás, conforme mostra a fig. 5.51 abaixo:



e. Trailing edge failure



f. Trailing edge failure

Figura 5.51: Trinca longitudinal nos bordos de fuga

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

- e. Trincas transversais ou no sentido da corda da pá (perpendiculares ao raio): para as pás em operação, caso uma trinca transversal ocorra no cerne da pá, em qualquer secção ao longo do raio, isso significa que se pode esperar que essa trinca vá se desenvolver mais intensamente muito em breve, conforme mostrado abaixo:



a. Transverse cracks observed on the max chord area



b. Transverse and longitudinal cracks led to blade replacement



c. Transverse crack



d. Transverse crack combined with longitudinal crack

Figura 5.52: Trincas transversais ao sentido de laminação

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

f. Falhas de Delaminação: A delaminação de materiais compósitos é um modo de falha que se refere ao enfraquecimento e à separação das camadas de compósitos depositadas sobre a superfície das pás, tais como tintas epóxi, por exemplo. A causa principal se dá pelo enfraquecimento das ligações que prendem as camadas do compósito juntas, o que significa dizer que o adesivo entre as camadas de fibra de vidro começa a se quebrar, como se estivesse vitrificando. Uma vez que isso ocorra no material compósito, a lâmina em si não irá necessariamente mostrar quaisquer sinais de desgaste, contudo, sua degradação será então totalmente inesperada. No entanto, devido ao processo de delaminação da camada superficial da pá ter se iniciado, esta pode apresentar sinais deste modo de falha sob a forma de rachaduras, o que pode ser observado visualmente em uma inspeção de rotina na parte exterior da casca da pá, conforme mostrado na figura 5.53 abaixo:



Figura 5.53: Trincas observadas devido ao processo de delaminação

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

Em alguns casos, a delaminação pode levar à separação total entre o lado da pressão e o lado de sucção dos bordos de fuga, como pode ser visto na figura 5.54 abaixo:

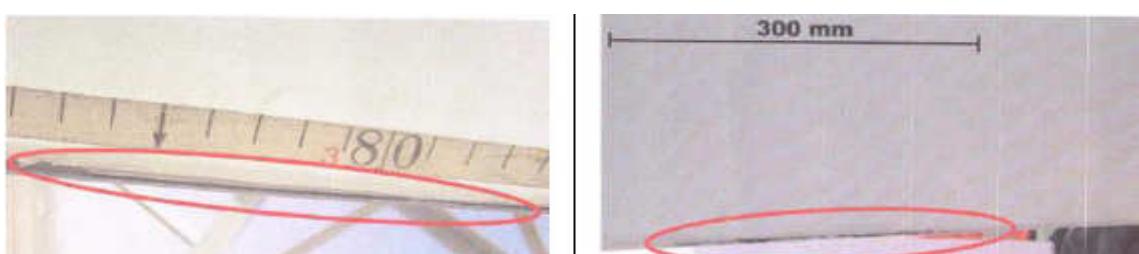


Figura 5.54: Delaminação ao longo do bordo de fuga de uma pá de um aerogerador

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.55: Outras falhas de delaminação nos bordos de fuga

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

g. Rompimento estrutural: quebra da pá por fadiga ou outros esforços.

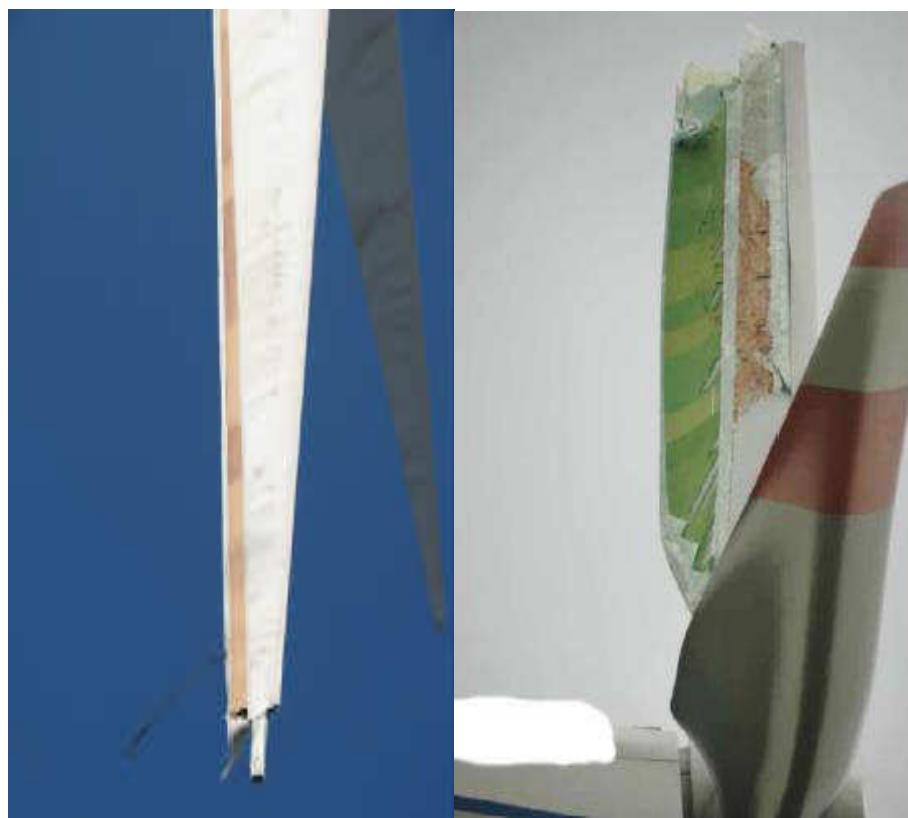


Figura 5.56: Pás defeituosas apresentando ruptura estrutural

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.57: Pá apresentando rompimento estrutural

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.58: Pá apresentando rompimento estrutural

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8



Figura 5.59: Rompimento de pás sujeitas a intempéries no campo

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

h. Outros Danos Diversos:



Figura 5.60: Rebarbas de colagem soltas na parte interna

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

Corpos estranhos no interior de uma pá: do excesso de cola se desprenderam pequenas pedras. Este dano em particular não tem qualquer impacto sobre a performance ou bom funcionamento da pá. No entanto, quando a turbina está em operação, emite um som estranho, que parece uma “espécie de chocalho”, denominando-se de “turbina-cascavel”.



Figura 5.61: a, b, c respectivamente, mostra consequências do impacto físico de objetos estranhos, tais como aves e insetos por exemplo.

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

- a) Esquerda: impacto de ave produziu grande trinca na superfície do painel da pá.
- b) Centro: pintura e camada preliminar do gel danificada devido impacto de ave.
- c) Direita: pequenos arranhões na casca da pá, causados por ave ou outro objeto qualquer.

Nota: outros corpos estranhos como insetos por exemplo, podem provocar considerável perda de rendimento das máquinas, uma vez que ao baterem nos bordos, lá se colam devido ao esmagamento na superfície das pás. No Nordeste do Brasil por exemplo, temos grande incidência de gafanhotos em determinadas épocas do ano, ao passo que na região Sul predominam as formigas aladas na época do acasalamento. Fig.5.62 abaixo:



Figura 5.62: Insetos podem impactar as pás e causar rugosidade que prejudica o desempenho

Fonte: própria

Podem ocorrer ainda danos durante o transporte das pás aos parques conforme abaixo:



Figura 5.63: Danos causados durante o transporte

Fonte: Bladena Failure Catalog V2_8

6. INSPEÇÃO E MANUTENÇÃO DE AEROGERADORES

6.1. INSPEÇÃO DE MANUTENÇÃO

Os modernos aerogeradores são projetados para durarem cerca de 20 anos ou 120.000 horas de operação contínua (66% de eficiência em 20 anos de utilização). No entanto, como visto anteriormente, dadas as condições e características dos ventos brasileiros, bem como do atual fator de capacidade em vigor, esta vida útil tende a ser realisticamente bem menor, algo em torno de 11,1 anos – (fontes: *MAKE Consulting, ISL Wind – A.Rowell, B.Koike e A. Reuter – Fraunhofer Institut*). De toda forma, as causas dos principais problemas podem ser atenuadas com um eficiente plano de manutenção preventiva e preditiva, o que ainda não acontece no mercado brasileiro, para o qual não temos um histórico de falhas detalhado e acumuladas em um banco de dados devidamente organizado. Considerar a substituição de alguma das partes visando garantir a vida útil é uma prática que pode ser considerada viável, desde que verificadas as condições dos demais componentes.

A inspeção de aerogeradores deve ser realizada em intervalos regulares, dependendo do sistema em análise. No caso específico das pás, a manutenção quando não corretiva, mas preventiva, varia de fabricante para fabricante de turbinas, localização do parque, assim como por outras condições geomorfológicas existentes. Via de regra, recomenda-se:

- Aerogeradores < 300 KW → uma manutenção a cada 4 anos
- Aerogeradores entre 300 e 1500 KW → a cada 2 anos
- Aerogeradores > = a 1500 KW → anualmente

Segundo fontes do segmento, em casos extremos e sendo necessária a reposição de uma pá, esta pode custar até US\$ 150.000, isto sem se considerar o tempo de parada em que se deixou de gerar energia.

A inspeção de manutenção pode ser feita das seguintes maneiras:

1. Binóculos, para se verificar e reportar falhas e danos visuais.
2. Telescópio, com detalhamento em fotos técnicas de cada falha ou dano encontrado.
3. Visual de especialista, através do uso de cordas, conforme foto 5-31 abaixo.

4. Plataformas de trabalho, com acesso manual, conforme fig. 6.1 abaixo.



Figura 6.1: Inspeção visual para constatação de dano feita através de acesso por corda

Fonte: www.8p2.de

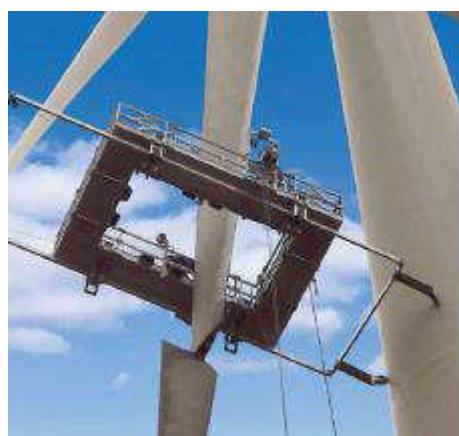


Figura 6.2: Plataforma de acesso manual

Fonte: *Catálogo Power Climber Wind*

5. Através do toque ou batidas na superfície, visando se detectar falhas estruturais, bolhas, tecido seco, etc. (martelinho)
6. Defeitos estruturais: executar tomografia, bem como outros testes não destrutivos, dentre os quais: Líquidos Penetrantes para trincas pouco visíveis a olho nu, Xerografia, Ultrassom, Acústica, Termografia, Tomografia, Raio-X, Partícula Magnética, etc., dependendo do tipo de situação e componente inspecionado.

6.2. MANUTENÇÃO PREVENTIVA

É a manutenção efetuada com a intenção de reduzir a probabilidade de falha no aerogerador, ou ainda a degradação de um serviço anteriormente já prestado. É uma intervenção prevista, preparada e programada antes da data provável do

aparecimento de uma falha, ou seja, é o conjunto de serviços de inspeções sistemáticas, ajustes, conservação e eliminação de defeitos, visando a evitar falhas. É realizada em conformidade com um cronograma ou com índices de funcionamento da máquina. Normalmente, o período de revisão é baseado em históricos ou recomendações do fabricante. Enquadram-se nessa categoria as revisões sistemáticas do equipamento, as lubrificações periódicas, os planos de inspeção de equipamentos e os planos de calibração e de aferição de instrumentos. Em alguns casos e sob determinadas circunstâncias, alguns componentes são substituídos antes do fim da sua vida útil, pois certos componentes substituídos apresentam falhas prematuras ou falhas de montagem. Outra desvantagem deste sistema é o alto custo envolvido na revisão.

A manutenção preventiva por tempo são os serviços preventivos preestabelecidos através de programação (preventiva sistemática, lubrificação, inspeção ou rotina) definidas por unidades de calendário (dia, semana) ou por unidade não-calendário (horas de funcionamento, quilômetros rodados, etc.).

A ação preventiva por estado são os serviços preventivos executados em função da condição operativa do equipamento (reparos de defeitos, preditiva, reforma ou revisão geral, etc.). No caso dos aerogeradores é comum se utilizar dos chamados testes não destrutivos para se detectar falhas potenciais, dentre os quais: Líquidos Penetrantes para trincas pouco visíveis a olho nu, Xerografia, Imagem Ultrassom, Acústica, Termografia, Raio X, Partícula Magnética, Lâmpadas de Ultravioleta, etc., técnicas as quais já se enquadram na classificação de manutenção preditiva.

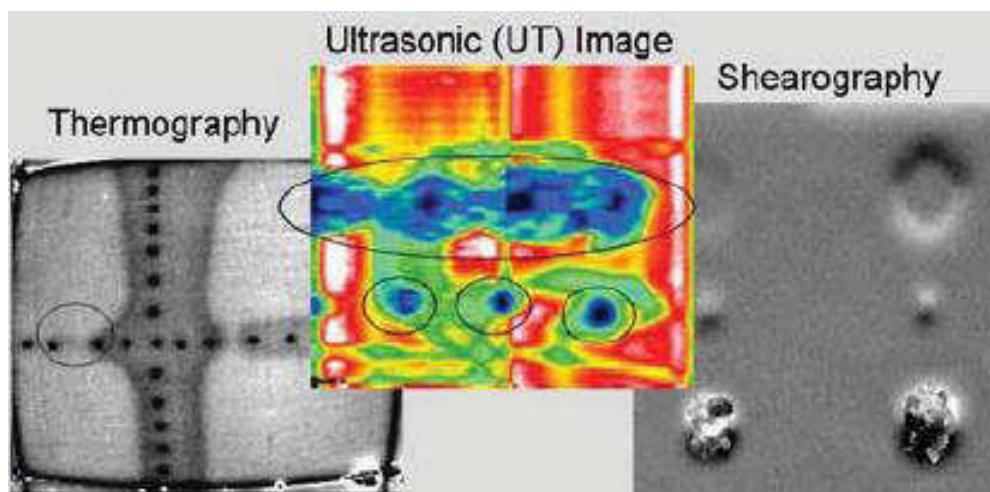


Figura 6.3: Imagem de testes não destrutivos – NDT

Fonte: NDT database handbook

6.3. MANUTENÇÃO PREDITIVA

Trata-se do conjunto de programas e técnicas especiais, conforme visto anteriormente, orientados para o monitoramento de máquinas e equipamentos em serviço. Sua finalidade é predizer falhas e detectar mudanças no estado físico que exijam serviços de manutenção, com a antecedência necessária para evitar quebras ou estragos maiores. Os principais objetivos da manutenção preditiva são:

- Reduzir os impactos dos procedimentos preventivos no resultado da operação;
- Eliminar desmontagens e remontagens para inspeção;
- Impedir propagação dos danos;
- Maximizar a vida útil total dos componentes de um equipamento.



Figura 6.4: Plataformas Elevatórias com unidade de serviço ao topo – Cortesia ISL Wind

Fonte: *ISL Wind Solutions – The Multi Pod -1*

7. CONCLUSÃO

Turbinas eólicas geralmente são agrupadas em parques remotos, ao contrário das centrais elétricas convencionais dos grandes centros. Por isso mesmo, são monitoradas remotamente e com recursos escassos. Estão muito expostas e sujeitas a intempéries e condições climáticas adversas, por vezes bastante duras, que vão desde a calmaria e ventos fracos, até a exposição a ventos severos, tempestades e condições térmicas que variam do calor tropical intenso da costa nordestina brasileira, por exemplo, até condições de frio intenso, com alta incidência de relâmpagos e rajadas fortíssimas, tal como ocorre no Sul do país. Além disso, devido a estas variações extremas, são fontes intermitentes de geração de energia, continuadamente sujeitas a mudanças nas cargas solicitantes de suas estruturas, ao contrário de usinas de energia convencionais, estacionárias e estáticas.

Como resultado destas condições de operação altamente variáveis, as turbinas eólicas ficam submetidas a inigualáveis esforços mecânicos, quando comparadas a qualquer outra forma de geração de energia. Consequentemente, exigem um elevado grau de manutenção para o fornecimento seguro, eficaz e confiável de potência, também de forma a manter sempre despachável a energia gerada, assim como estáveis e aceitáveis aquelas condições necessárias para garantir a longa vida útil projetada dos equipamentos instalados.

A abordagem da manutenção pode então ser classificada em três grandes grupos, quando associada à geração de energia eólica:

- Manutenção reativa: executa-se a manutenção somente quando ocorre a falha.
- Manutenção preventiva: executa-se o serviço de manutenção com base no tempo, de forma planejada e programada, geralmente de acordo com as especificações técnicas e recomendações dos próprios fabricantes dos aerogeradores.
- Manutenção Preditiva: baseada e realizada sob determinadas condições específicas, estabelecidas por padrões de análise que antecipa os problemas potenciais em tempo real.

Atualmente, no mercado eólico nacional, o parque, via de regra e na maioria dos casos, se utiliza predominantemente da manutenção reativa, ou seja, corrige-se o defeito apenas quando ocorre a falha ou eventual rompimento de algum

dos componentes, sendo que a manutenção preventiva é executada segundo o manual de serviço dos fabricantes da turbina, de acordo com planos definidos pelas OEMs e meios mencionados.

Nos últimos anos, muitos fabricantes de aerogeradores nos EUA foram afetados por significativos problemas derivados do mau funcionamento das pás, que variam desde falhas catastróficas até amplas campanhas de *retrofit*. As consequências são tanto financeiras como relacionadas à segurança das turbinas. Problemas como estes têm contribuído para aumentar as percepções negativas sobre a eficácia da energia eólica como fonte segura de energia, tanto pelo lado financeiro como público, o que resulta em perdas comerciais substanciais tanto para OEMs assim como para desenvolvedores e proprietários dos parques.

O Brasil ainda não possui a tradição de realizar a manutenção preditiva em parques eólicos e respectivos aerogeradores, principalmente pelo fato de esta técnica se utilizar de condições de monitoramento de maior tecnologia agregada, o que ainda tem seu custo bastante elevado, uma vez que muitos dos seus equipamentos são caros e por vezes importados. Contudo, como mostram alguns estudos recentes, as técnicas e estratégias de manutenção preditiva já são bastante conhecidas e praticadas nas indústrias de segmentos mais desenvolvidos, tais como Óleo e Gás, Nuclear, Aeronáutica, Militar e grandes centros de Processamento de Dados, bem como no segmento eólico no exterior.

Os dados disponíveis até o momento, coletados principalmente por empresas europeias e americanas atuantes no setor de manutenção de pás, mostram que parece haver uma alta taxa de falhas em pás de grandes dimensões (acima de 50 metros de comprimento), e por isso mesmo é de fundamental importância que se otimize as estratégias de manutenção das turbinas acima de 2MW e respectivos parques eólicos aonde estão instaladas estas máquinas. Isso também significa dizer que, concomitantemente à maior incidência das falhas, existe uma tendência de que os custos de manutenção cresçam exponencialmente, na medida em que a frota de pás envelheça e se tornem cada vez maiores no seu comprimento e envergadura, pois como sabemos, a quantidade de energia gerada por máquina é função direta da área varrida pelas pás, além do cubo da velocidade do vento, esta certamente, sua variável mais importante e determinante para a localização dos parques.

Também, é importante que se disponibilize e organize futuramente uma documentação associada ao funcionamento e performance dos aerogeradores, de forma a poder se classificar os tipos de falhas e defeitos encontrados nas pás, nos diversos parques e regiões brasileiras, cujo objetivo principal seria, além de otimizar o *LCOE – Custo Nivelado Da Energia*, ajudar a melhorar a confiabilidade das pás e formar um banco de dados confiável, de forma a auxiliar aos integrantes desta importante cadeia de suprimentos de matérias primas, componentes e máquinas, a agir de forma preventiva e preditiva nas suas estratégias de manutenção. Para tanto, poderiam utilizar-se de sistemas especialmente desenvolvidos e análises estatísticas confiáveis para esse fim. Por se tratar de tema que requer ampla coleta de dados e estudos complementares relacionados a confiabilidade e tratamento estatístico, deixaremos o assunto para ser eventualmente considerado em trabalhos complementares, talvez conjuntamente ao *INTER – Instituto Tecnológico de Energia Renovável*, bem como outras instituições e organizações interessadas.

De toda forma, espera-se que dentro em breve, nossos parques eólicos também passem a adotar as técnicas preditivas, tal como já o fazem parques eólicos instalados na Europa e USA, abrindo-se com isso, vasto campo de oportunidades de pesquisa e trabalho neste importante e estratégico segmento da economia nacional.

REFERÊNCIAS

ABDI, 2014 – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI, MDIC – Ministério da Indústria e Comércio – Mapeamento da Cadeia Produtiva da Indústria Eólica no Brasil.

BARROS, A. S. – Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas. Tese de (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br>: Acesso em 12-08-16.

BLADES – CHANGES IN FAILURE TYPE “Ultimate strength of a large wind turbine blade”, - BLADENA – Blade Enabler Inc.

BULIGA, ANDREI ; JENSEN, MØLHOLT FIND : Bladena – Blade Enabler – Blade Failure Catalog – version 2.0 – August 2015

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. – Wind Energy Handbook. John Wiley & Sons, LTD, 2008.

CARVALHO, A MARCELO – Material de apresentação da ITW no Congresso CONAEND 2016 – Patrocinado pela ABENDI – Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos. – Agosto de 2016

CARVALHO, L. – Procedimento detalhado para a confecção de pás eólicas. Departamento de Engenharia de Materiais do Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

CLEG, R. – Engineering Failure Analysis, Material, Structure, Components, Reliability and Design. -

CRESESP – CEPEL – Sistema Eletrobrás – Energia Eólica, Princípios e Tecnologias

DAYTON, A GRIFFIN ; MALKIN C, MATTHEW – DNV Renewables Inc. USA: Lessons Learned from Recent Blade Failures: Primary Causes and Risk-Reducing Technologies

ENERCON. Disponível em: <http://www.enercon.de/produkte/produktneuheiten/>. Acessado em: 06 de set. de 2016

ENERGITEKNOLOGISK UDVIKLING OG DEMONSTRATION, Bladena & Ratz Handbook – LEX Project Terms & Definitions – March 2015

GAYLORD, BRIAN – Desafios logísticos para o mercado eólico – Oportunidades e desafios para o mercado de O&E no Brasil – Paper apresentados pela MAKE Consulting em 2015 na Brazil Wind Power Congress – Rio de Janeiro.

JENSEN, FIND MOLHOLT – Scale up of wind turbines

MANWELL, J. F. & MC GOWAN, J. & ROGERS, A. – Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Ed, John Wiley & Sons, LTD, 2004, 569p.

Mc GUGAN, M., PEREIRA, G., Sørensen, B. F., TOFTEGAARD, H., and BRANNER, K., 2015, "Damage tolerance and structural monitoring for wind turbine blades", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 373: 20140077 – Technical University of Denmark – disponível em <http://www.ewea.org/offshore2015/conference/allposters/PO127.pdf>

MINISTÉRIO DA CIENCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – Programa demonstrativo para inovação em cadeia produtiva selecionada: Energia Eólica – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE – 2015

REUK. Disponível em: <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/wind-turbine-tip-speed-ratio/>. Acessado em: 18 de Agosto de 2016

VESTAS. Disponível em: <https://www.vestas.com/en/products/turbines/v164-8.0>. Acessado em: 09 de Agosto de 2016

WINDENERGIE. Disponível em:

http://www.windenergie.iwes.fraunhofer.de/content/dam/windenergie/en/video/Industrietandem_Koike%20Reuter.mp4. Acessado em: 20 de Outubro de 2016