



**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia de Energia**

**ANÁLISE DINÂMICA VIA ELEMENTOS FINITOS DE
UMA PÁ DE TURBINA EÓLICA**

**Autor: Maurício Miranda Gomes
Orientador: Dra. Suzana Moreira Avila**

**Brasília, DF
2015**



MAURÍCIO MIRANDA GOMES

**ANÁLISE DINÂMICA VIA ELEMENTOS FINITOS DE UMA PÁ DE TURBINA
EÓLICA**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador: Dra. Suzana Moreira Avila

**Brasília, DF
2015**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Miranda Gomes, Maurício.

Análise Dinâmica Via Elementos Finitos de Uma Pá de Turbina Eólica / Maurício Miranda Gomes. Brasília: UnB, 2015. 54 p. : il. ; 29,5 cm.

Monografia (Bacharel em Engenharia de Energia) –
Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2015. Orientação: Dra. Suzana
Moreira Avila.

1. Aerogerador. 2. Compósito. 3. Elementos finitos.
I. Moreira Avila, Suzana. II. Análise Dinâmica Via Elementos
Finitos de Uma Pá de Turbina Eólica.

CDU Classificação



REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA

Maurício Miranda Gomes

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 01 de julho de 2015 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. D. Sc.: Suzana Moreira Avila, UnB/FGA
Orientador

Prof. D. Sc.: Maura Angélica Milfont Shzu, UnB/FGA
Membro Convidado

Prof. D. Sc.: Marcus Vinícius Girão de Moraes, UnB/FT
Membro Convidado

Brasília, DF
2015

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, aos meus pais, Juvanil e Marli, que são exemplos de amor e dedicação e ao meu melhor amigo e irmão Cássio Mendes.

AGRADECIMENTOS

À professora Dra. Suzana Moreira Avila, minha orientadora, por sua atenção, conselhos, paciência e ensinamentos transmitidos ao longo do desenvolvimento deste.

Aos professores do *Campus Gama* da Universidade de Brasília, por tudo o que aprendi ao longo desses anos através deles.

Aos funcionários do *Campus Gama* da Universidade de Brasília pela ajuda indireta através de seu empenho no trabalho, permitindo-me estudar em um ambiente favorável.

Ao meu professor de Ensino Médio Luciano Byron que, sem saber, me ajudou a chegar até aqui, fazendo-me apaixonar pelos estudos.

Ao meu amigo Rafael Moura pelo companheirismo, ajuda, apoio e amizade durante sua permanência no *Campus Gama*.

Aos meus amigos, cuja companhia frequentemente era roubada pela minha dedicação a este trabalho.

Aos pelicanos, pelo apoio e conselhos em tudo o que faço.

Aos amigos que fiz em Brasília, amigos que levarei para o resto de minha vida.

É preciso exigir de cada um o que cada um pode dar. (Antoine de Saint-Exupéry)

RESUMO

O advento dos materiais compósitos no mercado veio com o objetivo de atender necessidades de diversos segmentos industriais, visando-se obter comportamentos mais eficientes em relação aos chamados materiais de engenharia convencionais, como por exemplo facilidade de processamento e possibilidade de combinação de propriedades associado por vezes, ao baixo custo de fabricação. Além disso esse tipo de material, alia alta resistência mecânica com boa ductilidade. A energia eólica é a fonte de geração de energia elétrica que mais cresce no Brasil, o que viabiliza estudos nessa área no país. É de grande importância uma análise minuciosa do comportamento das pás dos aerogeradores e dos parâmetros geométricos desta já que estas representam 15 a 20% do custo total do aerogerador e tem relação direta com a potência, tornando um dos componentes mais importantes deste. Este trabalho apresenta uma modelagem de uma pá de turbina eólica a fim de realizar uma análise dinâmica deste tipo de estrutura através do método de elementos finitos utilizando o pacote computacional ANSYS® onde três simulações são realizadas: modal, harmônica e transiente. São considerados dois materiais compósitos, as fibras aramídicas (Kevlar®) e as fibras de vidro. A partir dos resultados obtidos nas simulações, observa-se que, comparando os dois materiais, as duas primeiras frequências se aproximam, havendo maior discrepância nos valores obtidos para as frequências mais altas. Na análise harmônica, verifica-se que o harmônico associado à primeira frequência é o mais influente na resposta para os dois materiais apresentados. Percebe-se, no entanto, que a amplitude da resposta permanente que corresponde ao primeiro pico é menor para o caso da fibra de vidro do que para o caso do Kevlar. O mesmo observa-se nos resultados no domínio do tempo.

Palavras-chave: Compósito. Aerogerador. Elementos finitos. Fibras de vidro. Kevlar.

ABSTRACT

The advent of composite materials came on the market in order to meet the needs of various industries, in order to obtain more efficient behaviour in relation to called conventional engineering materials, such as ease of processing and the possibility of combination of properties often associated to low cost manufacturing. Moreover this type of material combines high strength with good ductility. Wind energy is the source of power generation the fastest growing in Brazil, thus enabling studies in this area in the country. It is very important a thorough analysis of the behavior of the blades of the wind turbines and the geometric parameters of this as these represent 15-20% of the total cost of the wind turbine and is directly related to power, becoming one of the most important components of this. This work presents a model of a wind turbine blade in order to perform a dynamic analysis of this type of structure by finite element method using the computational package ANSYS® where three simulations are performed: modal, harmonic and transient. Two composite materials, aramid fibers (Kevlar) and glass fibers, are considered. From the results obtained from the simulations, it is observed that, comparing two materials, the first two frequencies are close, where there is greater discrepancy in the values obtained for the higher frequencies. In the harmonic analysis, it is found that the harmonic associated with the first frequency is the most influential in response to the two materials presented. It is clear, however, that the extent of permanent response that corresponds to the first peak is low to fiberglass case than in the case of Kevlar. The same is observed in the results in time domain.

Keywords: Composite. Wind turbine. Finite element. Glass fiber. Kevlar

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (EPE, 2014).	5
Figura 2. Porcentagem de contribuição na geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2014).....	6
Figura 3. Moinho de vento (www.kinderdijk.nl).....	7
Figura 4. Veleiro (www.arella.com).....	7
Figura 5. Atlas eólico brasileiro (PIRES, 2010)	8
Figura 6. Parque Nacional de Osório no Rio Grande do Sul.....	9
Figura 7. Funcionamento básico de um aerogerador.....	10
Figura 8. Diâmetro do rotor (evolucaoenergiaeolica.wordpress.com)	10
Figura 9. Aerogeradores tipo Darrieus (A) e Savonius (B).	11
Figura 10. Principais componentes de um aerogerador. (Petrobrás/Cenpes).....	13
Figura 11. <i>Pitch</i> : Controle de regulação por Ângulo de Passo (WENDEL, 2007).	14
Figura 12. Gerador de energia eólica (www.pureenergycentre.com)	15
Figura 13. Turbina eólica com uma pá. (www.odt.co.nz)	16
Figura 14. Turbina eólica com duas pás (www.windenergysolutions.nl)	16
Figura 15. Potência gerada de acordo com o diâmetro do rotor (web.bndes.gov.br).	17
Figura 17. Diferentes modelos de pás. (www.kidwind.org)	19
Figura 18. Disposição das fibras: (a) Contínuas e alinhadas; (b) descontínuas e alinhadas; (c) orientação aleatória	21
Figura 19. Reforço particulado	22
Figura 20. Reforço estrutural laminado	22
Figura 21. Esquema de classificação dos compósitos (CALLISTER, 2000)	23
Figura 22. Influência do diâmetro na resistência à tração das fibras de vidro.	25
Figura 23. Visão microscópica de um compósito reforçado com fibras de vidro (FELTRAN, 2007).....	26
Figura 24. Custo e desempenho relativo de algumas fibras de alta resistência (CAMPBELL, 2010).....	27
Figura 25. Material feito de Kevlar® (www.sollercomposites.com).....	28
Figura 26. Comparativo de massa específica (g/cm^3) (FELIPE, 2012).	30
Figura 27. Exemplo de refinamento de malha 3D e 2D (MADENCI, 2006)	34
Figura 28. Modelo simplificado da pá.....	38
Figura 29. Direção do carregamento distribuído na placa (autor)	39

Figura 30. Primeiro modo de vibração	40
Figura 31. Segundo modo de vibração	40
Figura 32. Terceiro modo de vibração.....	40
Figura 33. Quarto modo de vibração	41
Figura 34. Resposta em frequência do nó da extremidade da placa: (a) Kevlar; (b) Fibra de vidro	41
Figura 35. Evolução no tempo do deslocamento do nó da extremidade da pá. (a) <i>Kevlar</i> ®; (b) Fibra de vidro	42

LISTA DE ABREVIATURAS

AEH	Aerogerador de eixo horizontal
AEV	Aerogerador de eixo vertical
MEF	Método dos Elementos Finitos
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
PCH	Pequenas Centrais Hidrelétricas
CGH	Centrais Geradoras Hidrelétricas

LISTA DE SÍMBOLOS

E_1	Módulo de elasticidade na direção X
E_2	Módulo de elasticidade na direção Y
E_3	Módulo de elasticidade na direção Z
G_{12}	Módulo de elasticidade transversal no plano XY
G_{23}	Módulo de elasticidade transversal no plano YZ
G_{31}	Módulo de elasticidade transversal no plano ZX
ν	Coefficiente de <i>Poisson</i>
\mathbf{M}	Matriz de massa da estrutura
\mathbf{C}	Matriz de amortecimento da estrutura
\mathbf{K}	Matriz de rigidez da estrutura
$\ddot{\mathbf{x}}$	Vetor de aceleração nodal
$\dot{\mathbf{x}}$	Vetor de velocidade nodal
\mathbf{x}	Vetor de deslocamento nodal
n	Dimensão de uma matriz
ω	Frequência natural de vibração
$x(\omega)$	Modo de vibração
θ	Ângulo de fase
t	Tempo
T	Menor período natural de vibração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1.	MOTIVAÇÃO	1
1.2.	OBJETIVO GERAL	3
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.4.	METODOLOGIA	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1.	O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	4
2.2.	A ENERGIA EÓLICA	6
2.3.	O AEROGERADOR	9
2.3.1.	Tipos de aerogerador	11
2.3.2.	A pá do aerogerador	17
2.3.3.	A aerodinâmica da pá	18
2.3.4.	Materiais atualmente utilizados	19
2.4.	COMPÓSITOS	20
2.4.1.	Definição	20
2.4.2.	Classificação dos compósitos	23
2.4.3.	Principais aplicações de compósitos	24
2.4.4.	Fibras de vidro	24
2.4.5.	Fibras aramídicas	27
2.5.	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	30
2.5.1.	Análise modal	30
2.5.2.	Análise harmônica	31
2.5.3.	Análise transiente	32
2.5.3.1.	Integração Numérica	33
2.5.3.2.	Método da Superposição Nodal	33
2.6.	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	33
2.7.	ESTADO DA ARTE	34
3	RESULTADOS NUMÉRICOS PRELIMINARES	38
4	CONCLUSÃO PARCIAL	43
5	PRÓXIMAS ETAPAS	44
6	CRONOGRAMA	44
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	ANEXOS	48

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta pontos positivos e negativos do uso energia eólica, dados numéricos da energia eólica no Brasil e no mundo como motivação deste estudo além de uma breve descrição dos materiais compósitos utilizados neste trabalho e do objetivo geral, específico e metodologia do mesmo.

1.1. MOTIVAÇÃO

Atualmente existem diversas fontes para obtenção de energia. Com a crescente escassez de recursos naturais, o estudo de novas formas de obtenção de energia tem sido intensificado, e um dos tipos de obtenção menos poluente é pelo meio da energia eólica, que consiste em captar a força dos ventos e transformá-la em energia mecânica e posteriormente transformar essa energia mecânica em energia elétrica. Esse processo é realizado por meio de aerogeradores.

A produção de energia por meio de aerogeradores tem diversos benefícios principalmente ecológicos. Essa tecnologia não emite gases poluentes causadores do efeito estufa e nem gera resíduos, além disso os parques eólicos podem ser instalados em diversas partes do mundo já que a viabilização destes parques se dá por meio de uma análise da velocidade e constância dos ventos no local em que se pretende instalar o parque. O investimento nesta tecnologia tem crescido bastante nos últimos anos tanto em desenvolvimento quanto em construção de parques eólicos.

Ainda que a energia eólica tenha diversos benefícios, são necessários alguns cuidados ao optar por esta energia pois antes optar por um parque eólico é necessária uma medição da velocidade dos ventos assim como em que épocas do ano os ventos possuem velocidades suficientes para os aerogeradores em questão funcionem. Outro problema dessa tecnologia é a poluição sonora gerada pelo giro das pás do aerogerador, a poluição visual, e a possibilidade de alteração na rota de pássaros que voam nas proximidades do parque eólico.

Segundo dados da *Global Wind Energy Council* (GWEC), a capacidade de produção de energia eólica global era de aproximadamente 25GW em 2000 e aumentou para 200GW em 2010. De acordo com Ribeiro (2014), em 2012 pelo menos 79 países possuíam essa fonte de energia sendo que 29 destes produzem

mais de 1GW anuais. A expansão de desenvolvimento dessa tecnologia tem reduzido os custos das turbinas, levando diversos países a optarem por essa forma de obtenção de energia elétrica.

Segundo Melo (2013), entre os anos de 2009 e 2012 foram contratados, no Brasil, 7GW em novos projetos de energia eólica. Essa quantidade é calculada em mais de 25 bilhões de reais em investimento no setor. Estima-se que em 2017 o Brasil tenha pelo menos 8,4 GW de capacidade. Essa estimativa é um produto do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) criado no país em 2004, que foi responsável pela contratação de 1.422,9 MW, por meio de preços subsidiados. Ainda segundo Melo, o preço médio atingido por esse setor é de R\$ 100,00/MWh, o que tornou este, o segundo setor mais competitivo do país.

A crescente necessidade do uso de fontes de energia não poluentes tem impulsionado estudos e investimentos em vários setores energéticos. Além disso, políticas de incentivo têm sido criadas a fim de viabilizar o desenvolvimento de pesquisas científicas que maximizem o uso destas fontes energéticas no Brasil. Juntamente com essa importância, há o advento dos materiais compósitos, que chegaram ao mercado com o objetivo de atender necessidades de diversos segmentos industriais, visando obter comportamentos mais eficientes do que os materiais de engenharia convencionais, como por exemplo a facilidade de processamento e possibilidade de combinação de propriedades associado por vezes, ao baixo custo de fabricação. Além disso, esse tipo de material alia alta resistência mecânica com boa ductilidade. Em geral, as pás dos aerogeradores são feitas de compósitos. Há um cuidado quanto à mecânica e resistência das pás já que, caso uma delas entre em colapso, toda a estrutura da turbina pode ficar comprometida ou ainda, as turbinas vizinhas podem ser comprometidas caso sejam atingidas por alguma pá de uma turbina que tenha entrado em colapso.

A utilização dos compósitos Kevlar® e fibras de vidro podem ser usados na construção de pás de aerogeradores já que, além de serem ambientalmente viáveis por se tratarem de fibras naturais, as simulações computacionais retornaram valores positivos quanto à resistência mecânica.

Kevlar® é uma marca registrada pela empresa DuPont e é constituída de fibras aramídicas. As fibras aramídicas são fibras orgânicas obtidas por extrusão e fiação a partir de poliamidas aromáticas. A resistência à tração e o módulo de

elasticidade longitudinal das aramidadas são muito superiores às correspondentes propriedades de outras fibras orgânicas (Moreira, 2009), mas tem muitas vezes de ser combinado com outras fibras para conseguir resistência à compressão aceitável. Depois do Nylon, esta tem sido considerada uma das mais importantes fibras sintéticas do mercado e tem sido utilizada em diversos setores da indústria.

As fibras de vidro são usadas para reforçar matrizes poliméricas, de modo a se obter compósitos estruturais e componentes moldados. Os compósitos de matriz plástica reforçada com fibras de vidro apresentam as seguintes características favoráveis: elevada razão entre resistência e peso; boa estabilidade dimensional; boa resistência ao calor, à umidade e à corrosão; boas propriedades de isolamento elétrico; facilidade de fabricação e custo relativamente baixo, por esse motivo são de longe o reforço mais utilizado (Lima et al., 2008).

Por fim, neste trabalho deseja-se verificar a eficiência e confiabilidade dos materiais Kevlar® e fibra de vidro para produção de pás de turbina eólica de grande porte.

1.2. OBJETIVO GERAL

Realizar simulações computacionais em um modelo aproximado de uma pá de turbina eólica afim de conhecer melhor o comportamento estrutural desta considerando dois tipos de materiais compósitos.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

Conhecer o *software* ANSYS®, que será utilizado nas as análises deste trabalho e entender cada uma dessas análises que serão necessárias para conhecer o comportamento da estrutura considerada.

Realizar três tipos de análises: modal, harmônica e transiente, em um modelo de pá real criado em um *software* CAD. Essas análises serão realizadas afim de conhecer melhor o comportamento do modelo com e sem carregamento em uma análise numérica para comparar com resultados experimentais e então adequar o modelo numérico afim de obter resultados suficientemente próximos dos resultados experimentais.

1.4. METODOLOGIA

Neste trabalho, pretende-se inicialmente conhecer o *software* ANSYS®, que será usado para realizar análises mecânicas utilizando o método dos elementos finitos (MEF), logo pretende-se também estudar o MEF. Inicialmente será analisado um modelo simplificado da pá utilizando um elemento de viga com um *design* simples, pois segundo Tong (2010) a deflexão, as frequências e outros comportamentos globais podem ser analisados com boa precisão utilizando elementos de viga. Serão realizadas as análises modal, harmônica e transiente na viga.

Será realizada uma pesquisa sobre materiais compósitos afim de conhecer quais possuem aplicação no setor eólico e escolher quais serão utilizados no presente trabalho.

Um modelo real da pá será desenhado em 3D em um *software* CAD e será exportado para o ANSYS®. Optou-se por importar o modelo do CAD pois a pá real possui um *design* complexo. No ANSYS® serão realizadas análises modal, harmônica e transiente afim de conhecer o comportamento da pá.

Por fim, serão coletados resultados de um experimento com uma pá de dimensões iguais à da simulação numérica para comparar com os resultados numérico e, então, adequar o modelo numérico afim de obter maior aproximação dos resultados experimentais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO

Este item apresenta um breve histórico do setor elétrico no Brasil além de dados de alguns setores e informações sobre o setor elétrico atual, afim de consolidar o entendimento do tema do presente trabalho.

O rumo tecnológico que consolidou a energia elétrica brasileira, sob o ponto de vista do desenvolvimento técnico, advém do avanço da tecnologia e ciência no mundo, sendo direcionadas de acordo com a disponibilidade de recursos e perfil de uso desta no país iniciada no século XX e impulsionada na década de 1950.

Segundo Silva (2006), o Brasil, não esteve presente na era do carvão ocorrida após a primeira revolução industrial, logo adaptou-se ao uso do petróleo e da

eletricidade advindos da segunda revolução industrial, ainda que o investimento em energia elétrica tenha sido intensificado apenas no final do século XIX. Os primeiros empreendimentos deste setor no Brasil surgem em 1883 e, neste mesmo ano, é criada uma termelétrica na cidade de Campos, no estado do Rio de Janeiro, com fins de abastecimento da rede elétrica de iluminação pública, substituindo a alimentação a gás. A partir desta, a tecnologia se espalhou pelo país.

No início do setor elétrico brasileiro, não haviam legislações para a padronização do funcionamento deste, o modelo que foi criado era o contrato de prestação de serviço entre o concedente e o concessionário (DELGADO, 2003). Assim, em 1930, o Brasil possuía aproximadamente 779 MW em usinas, para os padrões atuais, aceitas como de baixa potência. Estas eram, em sua grande maioria, hidroelétricas operando com pequenos reservatórios.

O Brasil possui um grande potencial em recursos hidrológicos. Aproximadamente 8% de toda a água do planeta é brasileira, logo o aproveitamento hidroelétrico nacional foi intensificado devido à grande disponibilidade do recurso. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), entre os anos de 2013 e 2014, o consumo de energia sofreu uma expansão da ordem de 3,7%. É possível observar na Figura 1) a capacidade de energia elétrica instalada, em MW, entre os anos 2009 e 2013 no país.

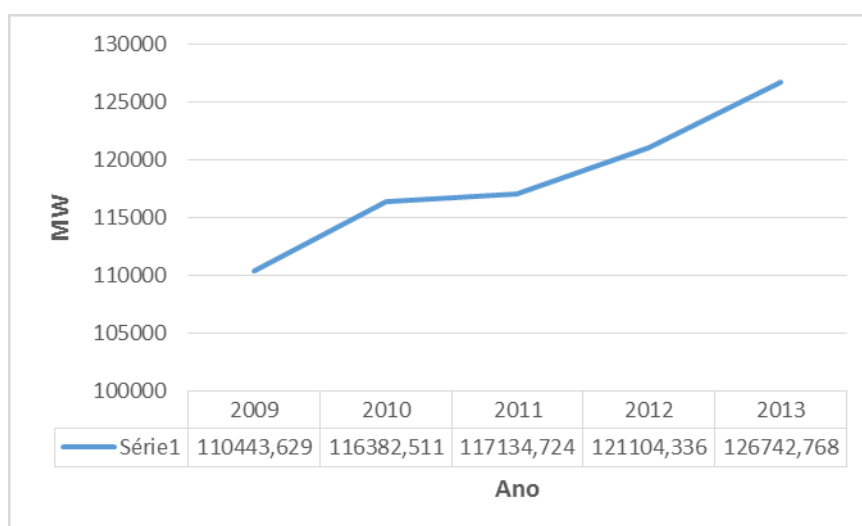


Figura 1. Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil (EPE, 2014).

A energia elétrica no Brasil provém, em sua maior parte, de Usinas Hidrelétricas e Termelétricas, porém as fontes renováveis têm crescido bastante no país nos últimos anos, tornando cada vez mais um reforço às matrizes energéticas

dominantes. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 2) apresenta a contribuição em porcentagem de cada tipo de geração de energia elétrica no ano de 2013 no Brasil, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2014).

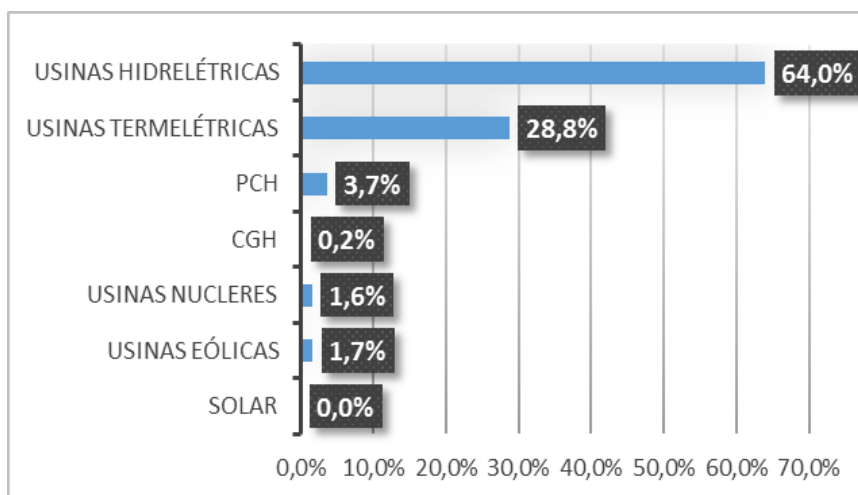


Figura 2. Porcentagem de contribuição na geração de energia elétrica no Brasil (EPE, 2014).

Atualmente a energia eólica é apenas mais uma das várias formas de obtenção de energia do setor elétrico. Além dela há as energias: hidráulica, energia proveniente de combustíveis fósseis, gás natural, gás mineral, nuclear, biomassa, entre outros.

2.2. A ENERGIA EÓLICA

Este item tem por objetivo apresentar um contexto da história e produção de energia eólica no mundo. Visa-se mostrar os métodos utilizados, os avanços obtidos no setor e mostrando o crescimento que essa forma de geração de energia tem alcançado.

A energia eólica tem sido utilizada desde a antiguidade, quando o homem utilizava de mecanismos que captavam a força dos ventos e a usava para substituir o trabalho humano, a exemplo os moinhos de vento (Figura 3) onde as pás são usadas para captar a força dos ventos transformando-a em energia mecânica. Outro exemplo são os veleiros ou barcos à vela (Figura 4), onde uma ou mais velas captavam a força dos ventos e esta força impulsionava o barco. As velas do barco eram apoiadas em um mastro e movidas por cordas, sendo direcionadas de acordo com o rumo o qual desejava-se ir. Acredita-se que os egípcios já utilizavam a vela desde 4.500 A. C.

O primeiro uso da energia eólica foi por meio de moinhos para moagem de grãos e acredita-se que se iniciou por volta de 200 A.C. na região da Pérsia. Acredita-se também que países do Oriente Médio e a China usavam essa tecnologia. Somente partir do século XII essa tecnologia chegou em outros países como Inglaterra e França e, logo depois, disseminou-se por toda a Europa.

O primeiro cata-vento criado com objetivo de converter de energia eólica em energia elétrica foi criado em 1888 por Charles F. Brush, onde o equipamento gerava 12 KW de corrente contínua, porém, devido à Revolução Industrial ocorrida no fim do século XIX, os cata-ventos foram substituídos pelas máquinas a vapor, eletricidade e combustíveis fósseis, porém, no mesmo século os cata-ventos reaparecem na agricultura. A partir daí a energia eólica teve constante crescimento, estimulada principalmente em alguns momentos específicos da história como na Primeira e Segunda Guerras mundiais e em 1970 devido à crise do petróleo.



Figura 3. Moinho de vento (www.kinderdijk.nl. Acesso em: 7 de abril 2015).



Figura 4. Veleiro (www.arella.com. Acesso em: 7 de abril 2015)

A energia eólica advém da energia solar. O planeta é aquecido, pelo sol, em diferentes proporções de acordo com a altitude e posição do sol. Segundo Camillo (2013), devido à orientação dos raios solares e dos movimentos da terra, há uma variação da massa específica e dos gradientes de pressão das camadas de ar, o que resulta em uma movimentação dessas camadas, logo a energia obtida do vento é uma energia cinética proveniente do deslocamento das camadas de ar. Pode-se concluir então que a energia eólica, por depender da incidência da luz solar sobre a Terra e de outros fatores meteorológicos, é uma fonte intermitente.

O Brasil possui potencial eólico em diversas regiões. É possível observar na Figura 5 que há ventos de até 8,5 m/s em algumas regiões, principalmente no Nordeste e Sul do país.

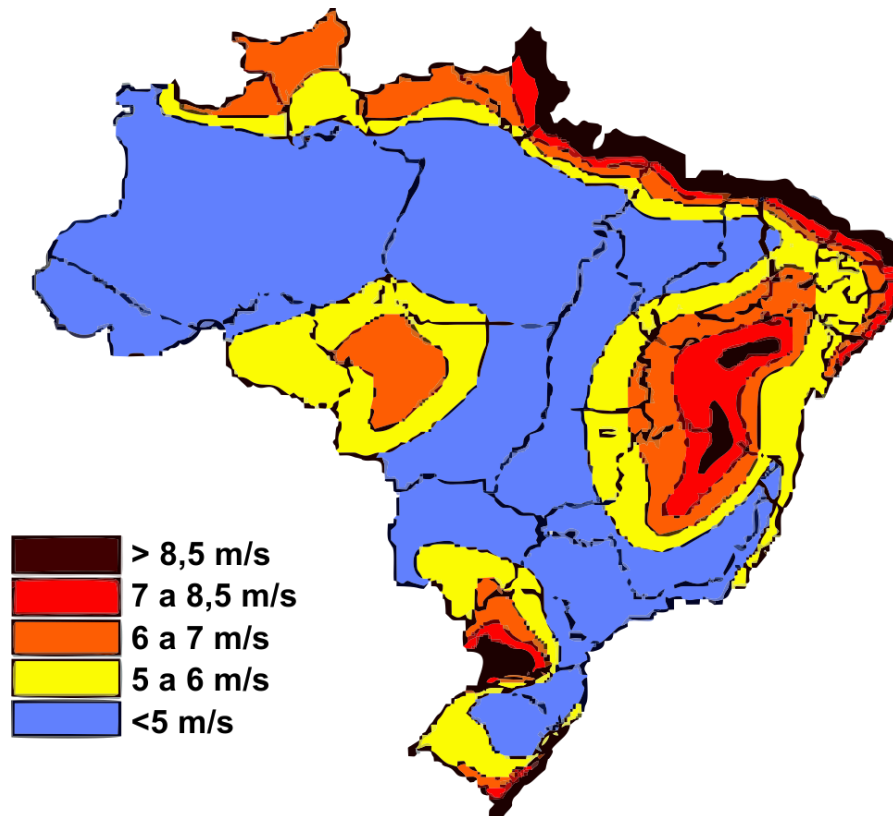


Figura 5. Atlas eólico brasileiro (PIRES, 2010)

Segundo a Associação brasileira de Energia Eólica (ABEE) em 2014 havia, no Brasil, 242 usinas instaladas com uma capacidade total de 6,08 GW. Há ainda no país uma capacidade de construção de 10,15 GW em energia eólica. O estado do Rio Grande do Sul conta com um dos maiores parques eólicos da América Latina, o Parque Nacional de Osório (Figura 6). Ele possui 75 aerogeradores de 2 MW cada um, gerando um total de 150 MW de potência.



Figura 6. Parque Nacional de Osório no Rio Grande do Sul.

2.3. O AEROGERADOR

Este item tem como objetivo a apresentação dos dois tipos de aerogeradores existentes, verticais e horizontais, assim como a apresentação e explicação da função dos componentes do aerogerador horizontal, estudado neste trabalho assim como o funcionamento deste e alguns dados deste setor. Há, por último, um estudo aprofundado da pá dos aerogeradores horizontais atuais.

A geração de energia eólica tem desenvolvido bastante nas últimas décadas. Desde o início, esta geração se deu por meio de diferentes tipos aerogeradores que, ainda que diferentes, possuíam e possuem o mesmo objetivo: captar a força dos ventos, transformando esta energia cinética em trabalho e, logo após, transformando este trabalho em energia elétrica por meio de um gerador que realiza a conversão e alimenta a rede elétrica (Figura 7). Teoricamente, é possível obter uma potência proporcional ao cubo da velocidade dos ventos e diretamente proporcional à área do diâmetro das pás do aerogerador, porém, na prática, apenas captura-se parte dessa potência (CAMILLO, 2013).

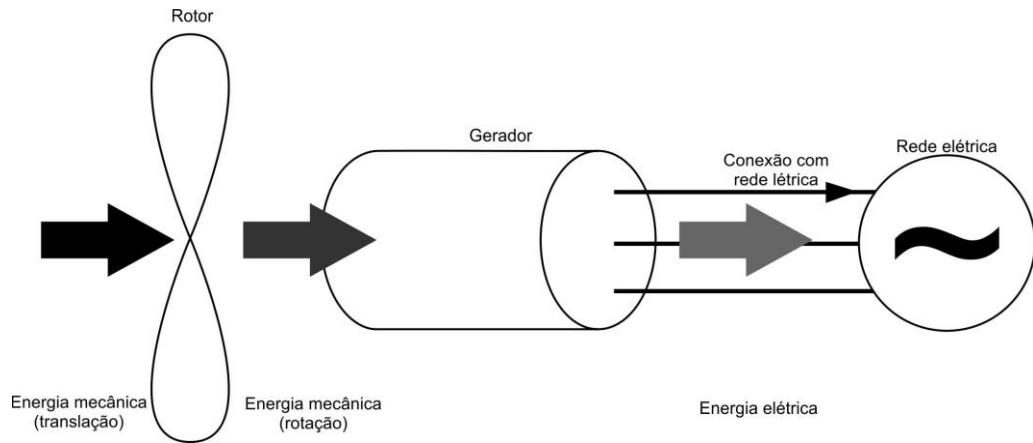


Figura 7. Funcionamento básico de um aerogerador

Nas últimas décadas, o investimento e desenvolvimento dos aerogeradores vêm crescendo bastante, resultando em turbinas mais potentes e maiores. A Figura 8) mostra a evolução do diâmetro do rotor e da potência das turbinas nas três últimas décadas. É possível notar o grande investimento que se tem dado nesta área, já que em poucos anos houve um grande desenvolvimento das turbinas.

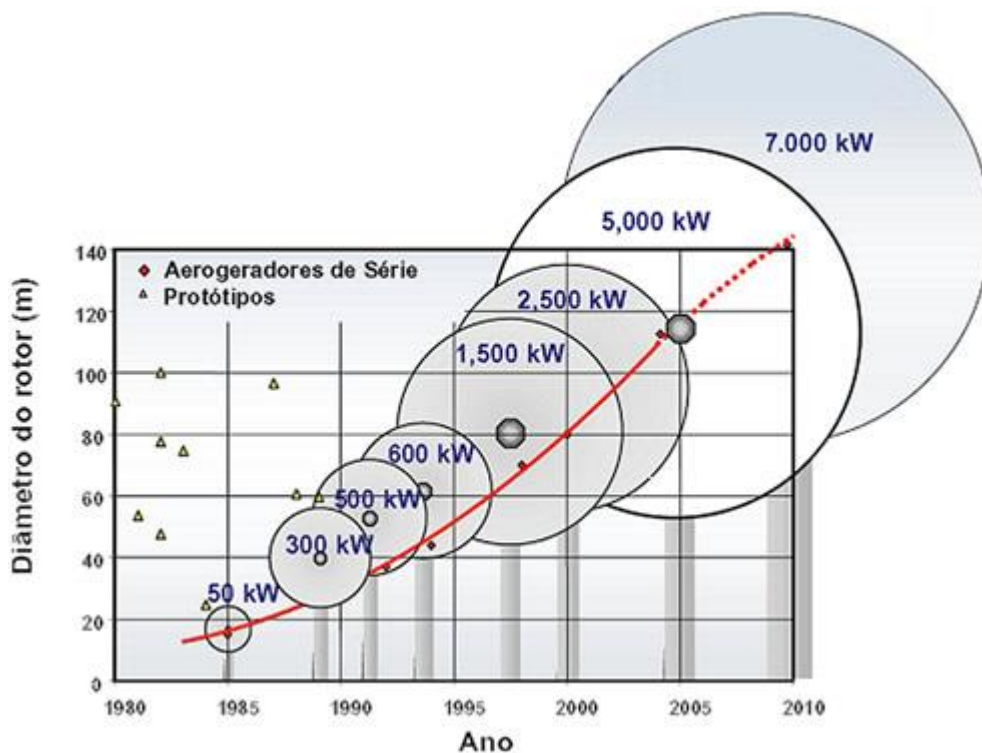


Figura 8. Diâmetro do rotor (evolucaoenergiaeolica.wordpress.com. Acesso em: 22 de maio 2015)

2.3.1. Tipos de aerogerador

2.3.1.1. Aerogerador vertical (AEV)

Os aerogeradores são classificados em dois tipos: aerogeradores de eixo vertical (AEV) e aerogeradores de eixo horizontal (AEH). Quanto ao AEV, existem dois tipos, o Darrieus, patenteado em 1926 por G.J. M Darrieus (Darrieus, 1926), que utiliza da força de sustentação advinda dos ventos, e o Savonius, patenteado por S. J. Savonius em 1929 (Savonius, 1929), que capta a força de arrasto advinda dos ventos.

Segundo Paraschivoiu (2009), o AEV do tipo Darrieus pode captar o vento de qualquer direção. O AEV usa pás retas ou curvas com eixos de rotação perpendiculares às correntes do vento. Atualmente esses aerogeradores verticais raramente são usados em máquinas de grande porte. Ambos os tipos são mostrados na Figura 9).

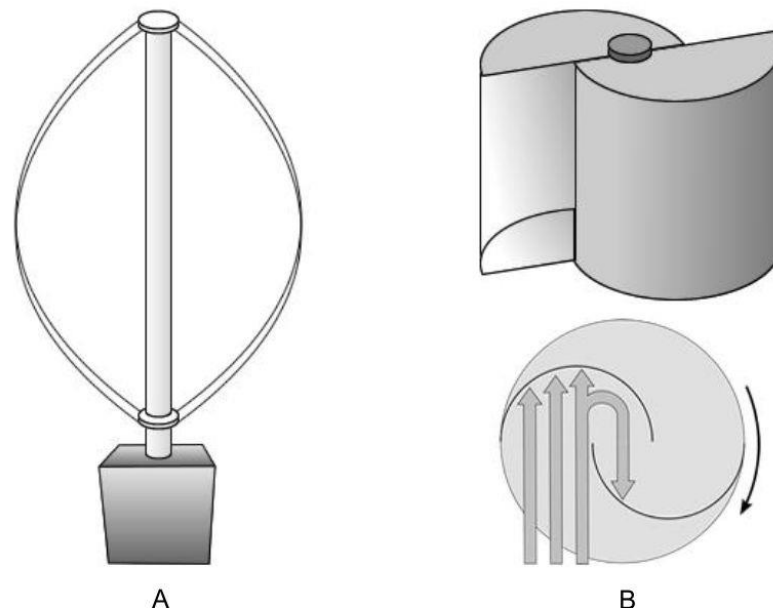


Figura 9. Aerogeradores tipo Darrieus (A) e Savonius (B).

2.3.1.2. Aerogerador horizontal (AEH)

Atualmente, existem no mercado dois tipos de AEH. O primeiro é aquele em que as pás giram com velocidade constante. Neste caso o gerador é ligado diretamente na rede elétrica e utiliza-se um equipamento apenas para limitar a corrente durante a conexão. O segundo opera com uma velocidade variável. Neste caso, o gerador não é ligado diretamente na rede elétrica, assim o rotor pode girar

em qualquer velocidade. Neste tipo de aerogerador, utiliza-se conversores de potência entre o gerador e a rede elétrica afim de maximizar o rendimento do aerogerador (Marques *et al*, 2002).

Os aerogeradores possuem um sistema de segurança que garante o correto funcionamento deste otimizando-o e protegendo-o de operações inadequadas ou instáveis. Esse sistema monitora as grandezas elétricas e mecânicas da turbina. Alguns de seus componentes são: Para-raios, proteção de curto-circuito e sobre corrente, proteção contra sub e sobre tensão e, finalmente, proteção contra sub e sobre frequência. Todo aerogerador necessita de um sistema de controle para garantir uma operação adequada (PAVINATTO, 2005).

Os principais componentes de um AEH estão descritos a seguir e apontados na Figura 10).

- Nacele: Parte do gerador onde ficam as engrenagens e o gerador elétrico;
- Pás: Responsáveis por captar a energia cinética dos ventos;
- Cone do rotor: Acopla as pás ao eixo da turbina;
- Eixo de baixa velocidade: Liga o cone do rotor à nacele.
- Eixo de alta velocidade: Aciona o gerador. Pode-se equipar um freio de segurança a este eixo.
- Caixa de engrenagens: Esta transforma a baixa rotação da turbina e o alto conjugado em uma elevada velocidade com menor conjugado.
- Gerador elétrico: Converte energia mecânica em elétrica. Geralmente usam-se geradores de indução ou síncronos.
- Controle de giro: Orienta a nacele para que as pás fiquem perpendiculares ao vento, de forma a maximizar a captação de energia. Geralmente quando o vento muda de direção a turbina gira. Tal atividade é conduzida por este equipamento.
- Torre de sustentação: É a que sustenta a turbina com todos os seus componentes. Atualmente as torres podem ultrapassar os 100 metros de altura.

- Sensores de vento: São um tipo de anemômetro acoplado a uma veleta. O primeiro mede a velocidade dos ventos enquanto o segundo monitora as direções deste.

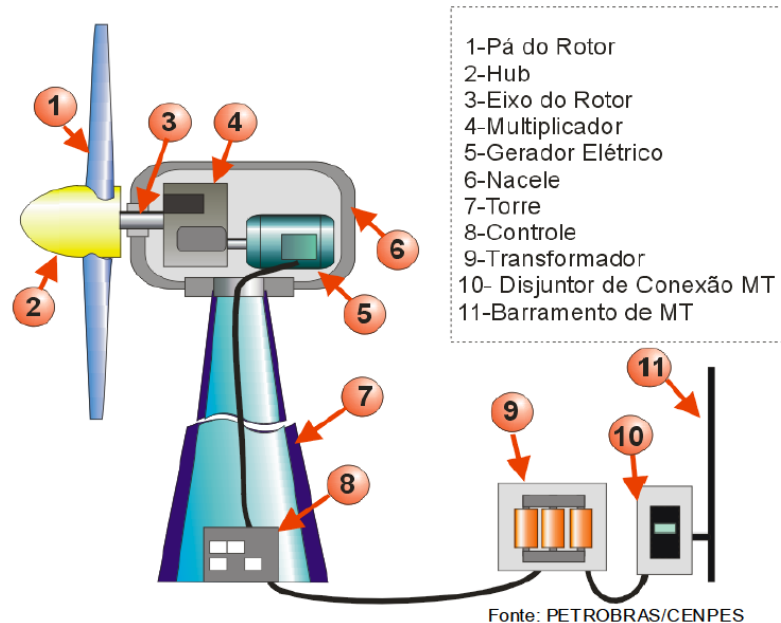


Figura 10. Principais componentes de um aerogerador. (Petrobrás/Cenpes)

Todos os aerogeradores horizontais possuem um funcionamento basicamente igual: As pás são movimentadas pela força dos ventos, este movimento é transmitido ao eixo, depois transmitido ao gerador e este último realiza a conversão eletromecânica gerando energia elétrica. É necessário que o vento tenha, pelo menos, uma velocidade que em geral é de aproximadamente 3,5 m/s, contudo, ventos com grande velocidade podem danificar a turbina, pois estes podem gerar uma grande variação na tensão da rede elétrica. Um aerogerador de 1,5 MW, por exemplo, suporta uma velocidade de até 25 m/s.

Devido à inconstância dos ventos, as turbinas são equipadas com um sistema de controle que limita a potência gerada em caso de ventos com alta velocidade, freando as pás. Dois dos sistemas mais utilizados são o *stall* e o *pitch*. O sistema *stall* evita com que a pá gire em torno de seu eixo, sendo que esta é fixada em seu ângulo de passo. O ângulo de passo é escolhido a fim de que, quando houver ventos maiores que a nominal, o fluxo em torno do perfil do rotor descola da superfície da pá, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as de arrasto, o que resulta em uma redução da potência do rotor (CRESECB, 2008).

O *pitch* basicamente controla a inclinação das pás do aerogerador. O sistema verifica a velocidade do vento e, se esta ultrapassa a potência nominal, o sistema modifica o alinhamento das pás, o que resulta na redução do ângulo de ataque do vento (BNDES, 2009). A Figura 11 apresenta um esboço do *Pitch*.

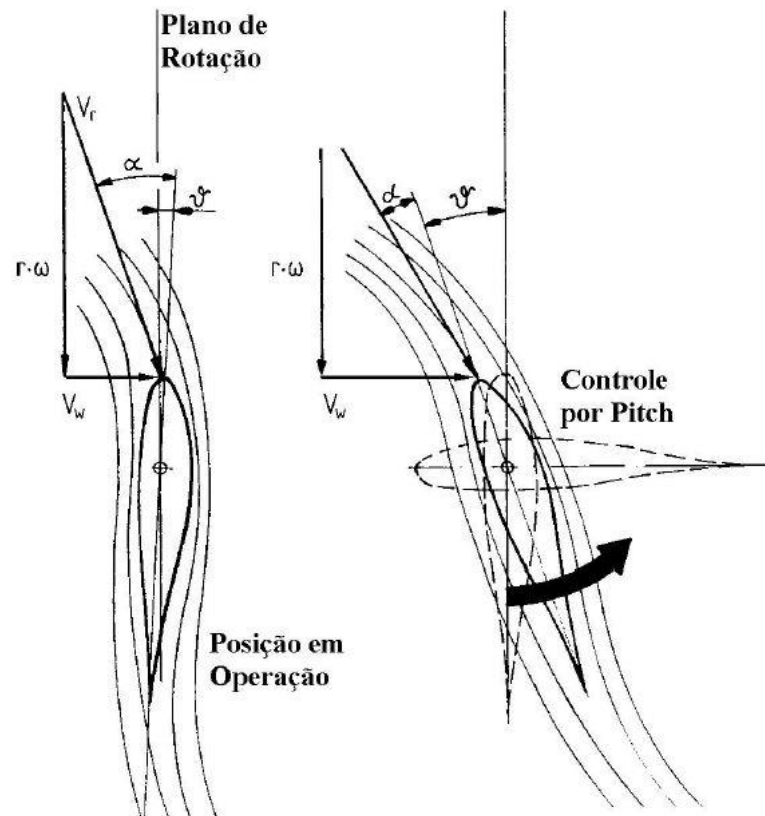


Figura 11. *Pitch*: Controle de regulação por Ângulo de Passo (WENDEL, 2007).

Segundo Wendel (2007), esse tipo de controle das pás, ainda que seja mais complexo e possua maior custo, é o mais utilizado, pois ele apresenta uma curva de potência onde é possível obter um ganho de energia com menores esforços de transmissão, o que viabiliza a sua adoção no sistema de controle das pás.

Os AEH capturam a energia cinética do vento com pás acopladas em um rotor e o seu eixo de rotação é paralelo às correntes do vento. Ao longo dos anos, o AEH foi bem mais desenvolvido e utilizado do que o AEV, ainda que ambos tenham a mesma eficiência (Paraschivoiu, 2009).

Atualmente são produzidos diversos modelos diferentes de aerogeradores horizontais. Os modelos possuem benefícios e malefícios específicos e podem ser utilizados de acordo com as necessidades e condições do local onde será instalada

a turbina. A turbina mais comercializada é que possui três pás alocadas de forma que tenham distâncias iguais entre si, ela está apresentada na Figura 12).



Figura 12. Gerador de energia eólica (www.pureenergycentre.com. Acesso em: 27 de abril 2015)

Esse tipo de turbina eólica possui menor velocidade de rotação, reduzindo a poluição sonora e a quantidade de colisões com pássaros. Há ainda um balanço de peso na turbina, já que as pás são alocadas a distâncias iguais entre si o que torna desnecessária a adição de contrapeso reduzindo assim o custo. Porém nesse tipo de turbina há gastos com outros equipamentos, por exemplo a caixa de transmissão.

Uma turbina pode conter um rotor com apenas uma pá, como é apresentado na Figura 13). Neste modelo, o rotor deve mover-se com maior velocidade afim de capturar a mesma quantidade de vento se comparado a outros modelos. Essa turbina possui menor peso, o que reduz o custo, porém é necessário colocar um contrapeso na pá, o que volta a aumentar o peso da turbina. Devido à sua maior velocidade de rotação, este tipo de turbina gera mais impacto sonoro, visual e gera maiores alterações na vida selvagem.



Figura 13. Turbina eólica com uma pá. (www.odt.co.nz. Acesso em: 2 de maio 2015)

Existem turbinas eólicas com duas pás direcionadas em direções opostas, como apresentado na Figura 14). Esse tipo de turbina obtém energia 5% menor que a turbina com três pás e suas vantagens e desvantagens são semelhantes às turbinas com apenas uma pá.



Figura 14. Turbina eólica com duas pás (www.windenergysolutions.nl. Acesso em: 2 de maio 2015)

2.3.2. A pá do aerogerador

É de grande importância um estudo e, conseqüentemente, o desenvolvimento do projeto das pás dos aerogeradores, já que este componente está diretamente ligado à eficiência da turbina. Na Fig. (4) mostrada anteriormente é possível notar o grande desenvolvimento do estudo das pás das turbinas ao longo do tempo, tendo o diâmetro aumentado em mais de 7 vezes entre os anos de 1980 e 2010 o que mostra a grande importância que se tem dado a este componente.

As pás representam 15 a 20% do custo total do aerogerador, sendo um dos componentes mais importantes deste (Yang e Sun *et al*, 2013; Schubel & Crosswell, 2012). Suas dimensões e geometria estão diretamente relacionadas à eficiência do aerogerador. É apresentada na Figura 15), uma relação entre a potência e o diâmetro do rotor do aerogerador.

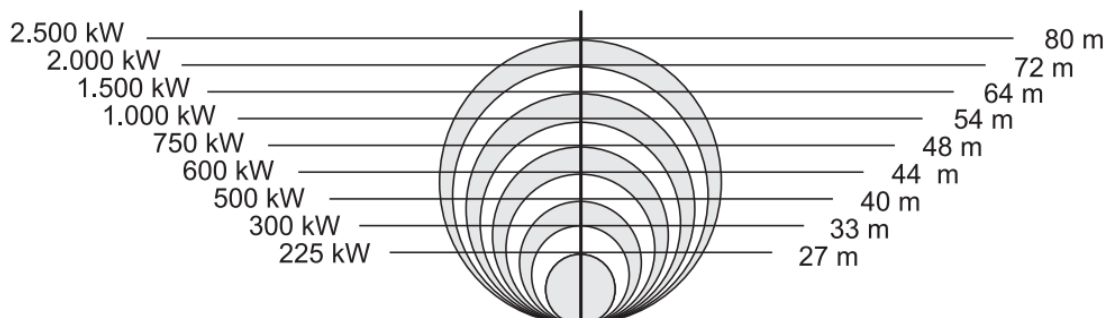


Figura 15. Potência gerada de acordo com o diâmetro do rotor (web.bndes.gov.br. Acesso em: 4 de maio 2015).

As pás têm sido produzidas em tamanhos cada vez maiores, chegando a 75 metros que é o caso da B75 da Siemens. Devido às grandes dimensões das pás, torna-se mais complexa a segurança do aerogerador, segundo Pinto (2013) a maioria dos acidentes com aerogeradores são ocasionadas por falhas ocorridas nas pás. As causas advêm justamente de falhas mecânicas devido às rajadas de vento, relâmpagos, fadiga, entre outros. Quando ocorrem essas falhas, é possível um arremesso geral ou parcial da pá, danificando outras pás ou até outros aerogeradores nas proximidades. Segundo o Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES), uma turbina com capacidade de 1,5 MW pode apresentar pás de 9 toneladas cada, assim, a logística relacionada às pás é complexa e possui alto custo.

2.3.3. A aerodinâmica da pá

Segundo Burton *et al* (2001) um bom projeto de pás deve satisfazer uma ampla gama de objetivos. Segue-se um resumo desses objetivos:

1. Maximizar o rendimento anual do aerogerador para a distribuição de velocidade do vento especificada;
2. Limitar a potência máxima (no caso de aerogeradores regulamentados);
3. Resistir a cargas extremas e fadiga;
4. Restringir grandes deflexões para evitar colisões com pás vizinhas;
5. Evitar ressonâncias;
6. Minimizar peso e custo.

O processo pode ser dividido em duas fases: o design aerodinâmico, onde são satisfeitos os objetivos 1 e 2 além do projeto estrutural da pá. É selecionada a geometria externa ótima para a pá, além da seleção do material de forma que as características resultantes destes satisfaçam os objetivos 4 e 6.

Existem, basicamente, três diferentes tipos de fabricantes nesse mercado. Um produz pás com modelos e dimensões padronizados de pás, chamados “prateleira”, por exemplo a dinamarquesa LM. Outro fabricante produz pás apenas sob encomenda, a exemplo da Tecsis, uma empresa brasileira. E por último, algumas empresas fabricam, além das pás, todos os demais equipamentos do aerogerador, por exemplo a Wobben, que é uma empresa do Brasil, subsidiária da alemã Enercon.

Existem vários formatos de pás, alguns estão apresentados na Figura 16). A modelagem aerodinâmica da pá é um dos fatores mais importantes para obter melhor aproveitamento da força do vento.



Figura 16. Diferentes modelos de pás. (www.kidwind.org. Acesso em: 9 de maio 2015)

2.3.4. Materiais atualmente utilizados

As pás das turbinas eólicas devem ser construídas com material de baixa densidade, alta resistência e que possua tolerância à fadiga. Mais de 50% das pás atualmente produzidas são feitas de material compósito. Segundo Tong (2010), as cascas que definem o perfil da pá geralmente são produzidas utilizando material compósito de matriz polimérica (por exemplo, fibra de vidro reforçada de poliéster) e estruturas sanduíche. A viga em formato de caixa, do termo em inglês *box girder*, geralmente é feita de compósitos de fibra de vidro ou fibra de carbono.

As fibras de carbono possuem módulo, densidade e resistência superiores às fibras de vidro, mas existem algumas desvantagens, elas possuem um custo mais elevado e a resistência à compressão pode ser menor que nas fibras de vidro. Segundo Tong (2010), a resistência à compressão das fibras de carbono é muito sensível aos defeitos na fabricação, por exemplo defeitos de desalinhamento ou ondulação das fibras. Uma vez que haja defeitos, a resistência pode cair bastante, comprometendo a qualidade do material.

Para algumas regiões da pá, por exemplo as estruturas internas sanduíche, madeira ou outros, materiais naturais podem ser utilizados pois estes possuem densidade muito menor que as fibras de vidro. Outros materiais, incluindo o bambu, têm sido estudados afim de serem utilizados em algumas partes da pá a fim de reduzir o peso desta.

Os compósitos são uma combinação de uma fibra e uma matriz. A matriz composta é um fator muito importante no compósito para a produção das pás. O poliéster, juntamente com as fibras de vidro, é a matriz mais utilizada atualmente. As resinas epóxi também têm sido utilizadas devido às suas propriedades mecânicas superiores. Cada material, misturado com uma matriz, possui custos, fabricação e propriedades mecânicas diferentes que devem ser considerados. Várias pesquisas têm sido desenvolvidas afim de encontrar novos materiais com melhores propriedades e com menor agressão ao meio ambiente.

Os termoplásticos também têm recebido bastante atenção nesse desenvolvimento já que este possui uma vantagem importante que é a sua reciclagem no fim do ciclo de vida da turbina.

2.4. COMPÓSITOS

Este item apresenta uma breve contextualização dos compósitos, sua definição, classificação, tipos e aplicações desses materiais na engenharia. Há ainda um aprofundamento nas fibras de vidro e Kevlar® que serão utilizadas nas análises realizadas neste trabalho.

2.4.1. Definição

Segundo Flinn (1981), compósito é um material formado a partir da combinação de dois ou mais materiais com diferentes propriedades, onde há uma fase contínua, composta pelo material que será a matriz, e uma fase descontínua, composta material que reforçará a matriz, o reforço. Ainda, segundo a ASTM D3878-95 compósito é uma substância constituída de dois ou mais materiais, insolúveis entre si e que, quando combinados, resultam em um material útil, tendo uma boa interface entre eles e com propriedades pré-determinadas (MARGEM, 2013).

No compósito, o reforço é adicionado à matriz obtendo então um novo material com propriedades superiores. Na mistura, tanto a matriz quanto o reforço mantêm suas características físicas e químicas originais, porém adquirem uma combinação de propriedades que não seriam adquiridas pelos constituintes atuando isoladamente. Essas propriedades são controladas por vários fatores, dentre eles as propriedades de seus constituintes, método de mistura, teores dos constituintes, distribuição dos constituintes e geometria dos reforços.

As propriedades anisotrópicas de um compósito são determinadas principalmente pela orientação das fibras do reforço na matriz e da interação entre as fases contínua e descontínua. A Figura 17) apresenta um esboço da disposição das fibras na matriz. Em (a) as fibras são contínuas e alinhadas, o que resulta em uma alta resistência na orientação das fibras, em (b) há um curto descontínuo das fibras, logo há uma pequena melhora na resistência, já em (c) as fibras estão orientadas aleatoriamente, gerando pouca resistência, porém esta resistência se dá em várias direções. O tipo disposição das fibras é adotado de acordo com as necessidades mecânicas as quais o compósito será submetido.

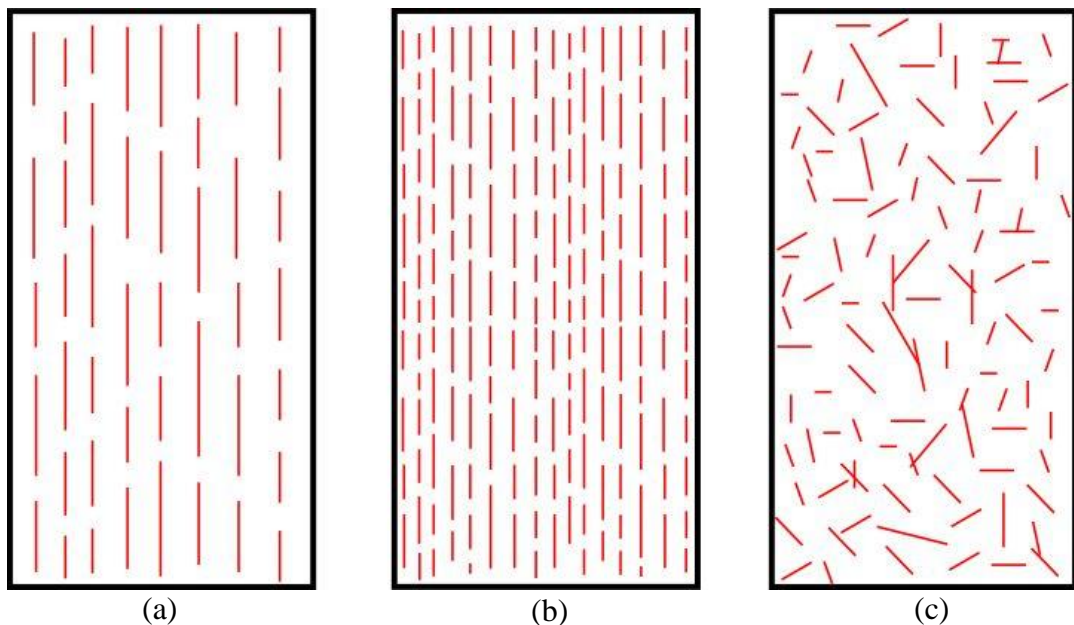


Figura 17. Disposição das fibras: (a) Contínuas e alinhadas; (b) descontínuas e alinhadas; (c) orientação aleatória

O reforço imerso na matriz pode ser também particulado (Figura 18) ou estrutural laminado (Figura 19). A fase de reforço particulado é, em geral, mais dura e rígida que a matriz, logo quando a matriz sofre uma tensão, esta é transmitida ao reforço que suporta uma fração desta força. Um exemplo deste tipo de reforço é o concreto, onde o cimento é a matriz e os agregados são os reforços particulados. No compósito estrutural várias lâminas são empilhadas, onde cada lâmina possui um alinhamento com orientação de 90° com a lâmina seguinte, resultando em um material com boa resistência em duas direções.

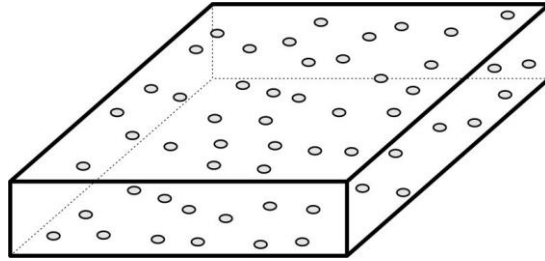


Figura 18. Reforço particulado

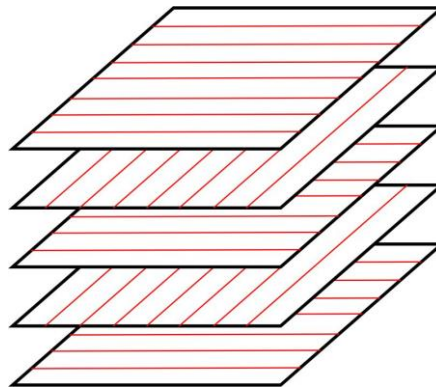


Figura 19. Reforço estrutural laminado

A vantagem do material compósito é que ele é capaz de aliar as melhores propriedades dos seus constituintes. Sua grande vantagem insiste em obter um material com as seguintes propriedades: Alta resistência; baixa densidade; alta rigidez; resistência à fadiga e corrosão; escolha de orientação das fibras; versatilidade de projeto; diversidade de combinações entre a matriz e as fibras; estabilidade dimensional; baixos níveis de ruído; longa vida útil. Claramente é muito difícil obter todas essas propriedades em uma única combinação matriz-fibra, mas geralmente não há necessidade de preencher todos esses requisitos. (CAVALCANTI, 2006).

Os materiais compósitos estão presentes na natureza há milhões de anos. A madeira e o bambu são alguns destes. A madeira, por exemplo, possui fibras de celulose imersas em uma matriz composta por lignina. A celulose possui uma grande resistência às tensões e ainda são bastante flexíveis, já a lignina fornece rigidez à madeira e une as fibras de celulose, protegendo-as (PEIXOTO, 2012).

2.4.2. Classificação dos compósitos

Os compósitos podem ser classificados de acordo com a composição química dos constituintes e com a geometria ou forma das fases presentes. É possível combinar um material orgânico com um inorgânico. Segundo Callister (2000), a classificação se dá também por meio dos tipos de reforços, sendo esses na forma de fibras, partículas globulares ou estrutural (Figura 20).

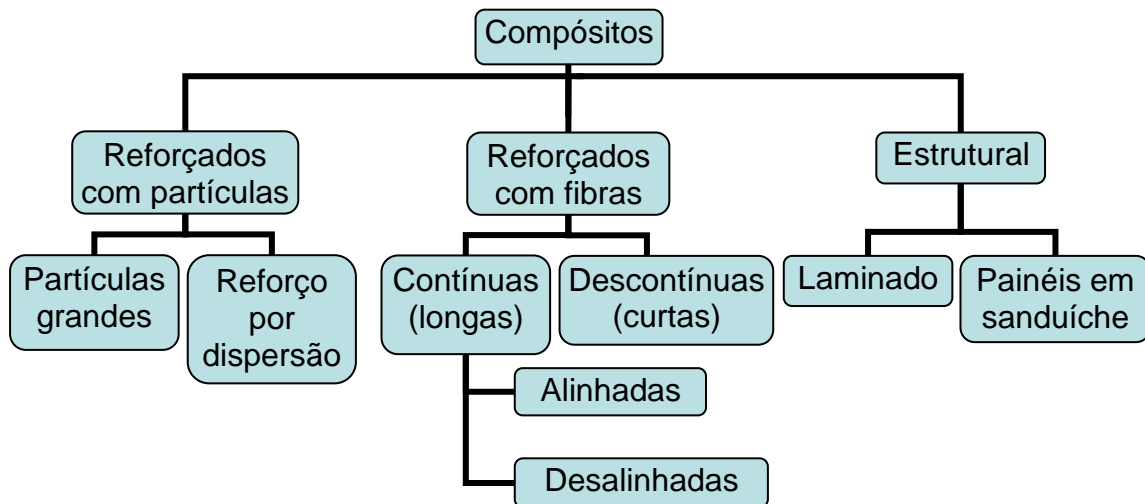


Figura 20. Esquema de classificação dos compósitos (CALLISTER, 2000)

Os compósitos também têm sido convencionalmente classificados de acordo com sua natureza química e física em cerâmicos, metálicos e poliméricos (CAVALCANTI, 2006). Os cerâmicos possuem como principais benefícios uma elevada resistência térmica, porém é um compósito extremamente frágil, os metálicos são dúcteis e ótimos condutores de eletricidade e temperatura, entretanto possuem elevada densidade e alto custo de fabricação, já os poliméricos possuem menor densidade, fácil amoldamento e elevada resistividade elétrica.

Os compósitos cerâmicos têm sido utilizados em menor escala que os demais devido à necessidade de elevadas temperaturas na fabricação, o que exige o uso de reforços que suportem essas temperaturas.

Os compósitos metálicos tiveram sua primeira aplicação em lança mísseis e aeronaves militares na década de 70 e ainda hoje esse tipo de compósito é desenvolvido e aplicado principalmente na área automobilística, mas com pouca frequência pois os compósitos poliméricos têm atendido melhor às necessidades da indústria.

Por último, há os compósitos poliméricos que são atualmente os mais utilizados e possuem propriedades superiores em desempenho. Esse tipo de compósito é dividido em dois grupos, termoplásticos e termorrígidos. A diferença entre eles é que os termoplásticos quando expostos a altas temperaturas podem mudar de forma, já o segundo não possui alteração de rigidez em altas temperaturas (VENTURA, 2009).

2.4.3. Principais aplicações de compósitos

O avanço tecnológico tem exigido materiais cada vez mais específicos, e os compósitos têm sido uma excelente opção para abastecer esse mercado. Esse sucesso dos compósitos depende do fácil acesso e aplicação dos compósitos nas várias áreas da indústria. As propriedades de massa específica, resistência, durabilidade e custos são primordiais nesse tipo de material e esses parâmetros têm sido desenvolvidos paralelamente à exigência do mercado.

As áreas de aplicação de compósitos são bem amplas, eles podem ser encontrados em grande parte da indústria, com destaque na construção civil, todas as áreas de transportes, nos eletrônicos e em produtos de consumo. No ano de 2009 o mercado de transportes era o mais significativo quanto ao uso de material compósito (31%), seguido pela construção civil (19,7%), marinha (12,4%), equipamentos eletrônicos (9,9%) e materiais de consumo (5,8%). A engenharia aeroespacial e de aeronaves representou 0,8%, porém é uma área em grande crescimento no setor (VENTURA, 2009).

2.4.4. Fibras de vidro

As fibras de vidro são compostas primariamente de óxidos metálicos modificados e sílica e são usados como reforços em matrizes poliméricas, sendo hoje o mais utilizado para reforço desta matriz. As fibras geralmente são produzidas pela conformação de vidro fundido através de pequenos orifícios (LEITE, 2011). A Tab. (1) apresenta a composição química das fibras.

Tabela 1. Composição química (%) das fibras de vidro (CALLISTER, 2000)

SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	B ₂ O ₃
55	4	15	16	10

Elas possuem um baixo custo, alta resistência à tração, alta resistência química e é um ótimo isolante, porém elas possuem um módulo em tração e resistência à fadiga baixos, massa específica relativamente alta quando comparada com outros compósitos comercializáveis, baixa resistência à abrasão e dureza elevada (que pode gerar desgaste no equipamento de corte e moldagem). A estrutura das fibras é tridimensional e forma uma longa rede de silício, oxigênio e alguns arranjos de outros átomos constituintes, porém as fibras possuem uma estrutura amorfa e isotrópica (MALLICK, 2007). As fibras possuem espessura entre 3 e 20 μm . A Figura 21) apresenta o efeito do diâmetro na resistência das fibras de vidro, podendo observar que, quanto maior o diâmetro das fibras, menor é a resistência à tração. É possível ainda, notar a brusca perda de resistência com a variação dos diâmetros menores, entre 3 e 10 μm .

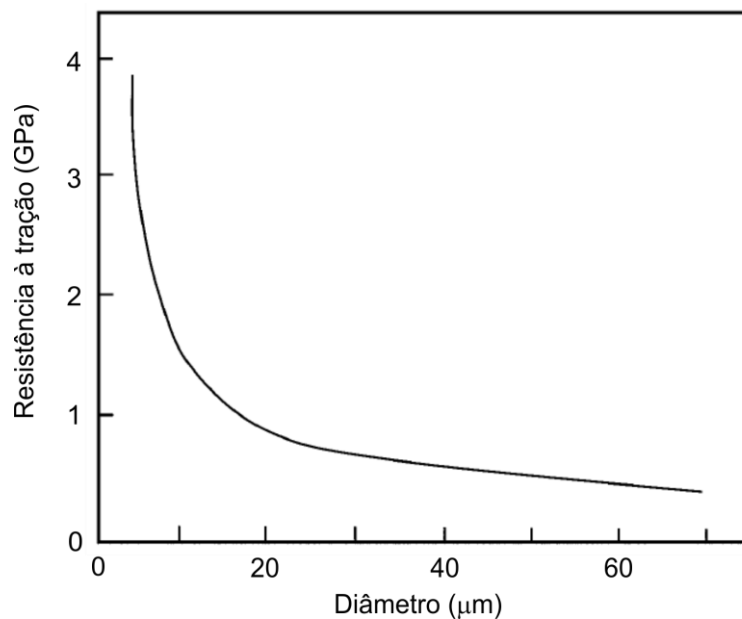


Figura 21. Influência do diâmetro na resistência à tração das fibras de vidro.

As fibras podem ser encontradas em diferentes formas dependendo das necessidades da aplicação, são exemplos de formas das fibras: fios, fios picotados, tecidos, mechas, etc. A Tabela 2) apresenta as propriedades mecânicas das fibras de vidro.

Tabela 2. Propriedades mecânicas das fibras de vidro (PERFORMANCE COMPOSITES LTD, 2009)

Densidade (kg/m ³)	E1 (GPa)	E2 (GPa)	G12 (GPa)	ν
1900	40	8	4	0,34

As fibras de vidro são responsáveis por cerca de 90% dos reforços usados em resinas termofixas, estes aumentam a resistência mecânica e possui baixos custos aos compósitos (CAVALCANTI, 2006).

A Figura 22 apresenta um compósito com fibras de vidro observadas microscopicamente, a imagem foi ampliada duas vezes. É possível observar o diâmetro das fibras de aproximadamente 15 μ m.

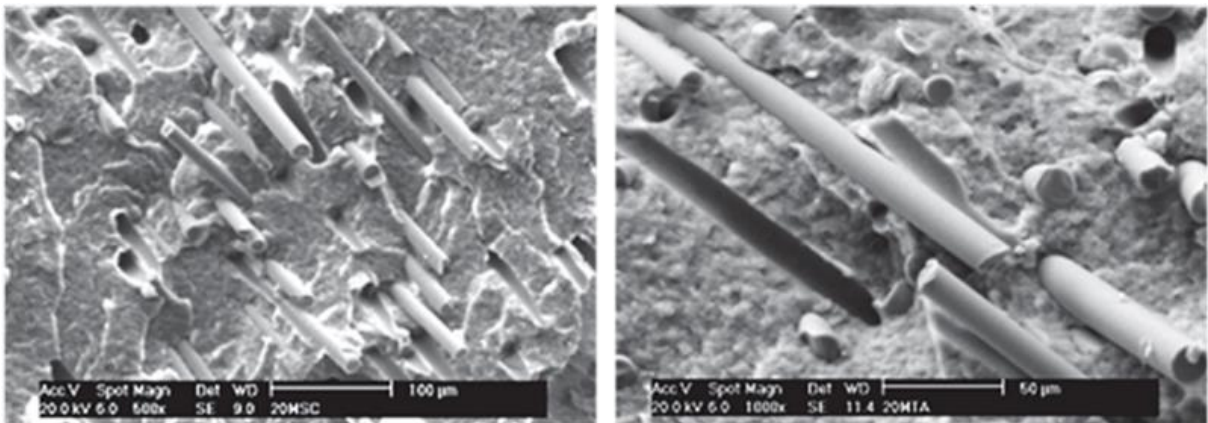


Figura 22. Visão microscópica de um compósito reforçado com fibras de vidro (FELTRAN, 2007)

As fibras de vidro podem ser facilmente fabricadas derretendo-se o vidro e existem várias técnicas para a fabricação. Os materiais de compósitos que usam reforços de fibras de vidro não devem exceder uma temperatura de 200°C, pois em altas temperaturas a rigidez do polímero decai bastante.

É comum encontrar fibras de vidro do tipo E e S, onde a fibra tipo E possui elevada resistividade elétrica, a letra E é atribuída à palavra *electrical*. O tipo S, que significa *strength*, possui elevada resistência à tração e foi originalmente criada para a produção de componentes de aviões e revestimento de projéteis. Existe ainda as fibras tipo C, menos popular e cuja letra é atribuída à palavra *corrosion*, que possui

elevada resistência à corrosão e são utilizadas em ambientes quimicamente severos ou em aplicações químicas (CARVALHO, 1992).

A Figura 23 apresenta uma relação de custo das fibras de vidro e o desempenho desta comparado a outros materiais. O vidro tipo S-2 diferencia-se do vidro tipo E devido à maior proporção de alumínio e sílica em sua composição, o que pode representar um aumento de 20% nas propriedades mecânicas. Ele foi utilizado inicialmente na área aeroespacial, mas expandiu-se para outros setores da indústria.

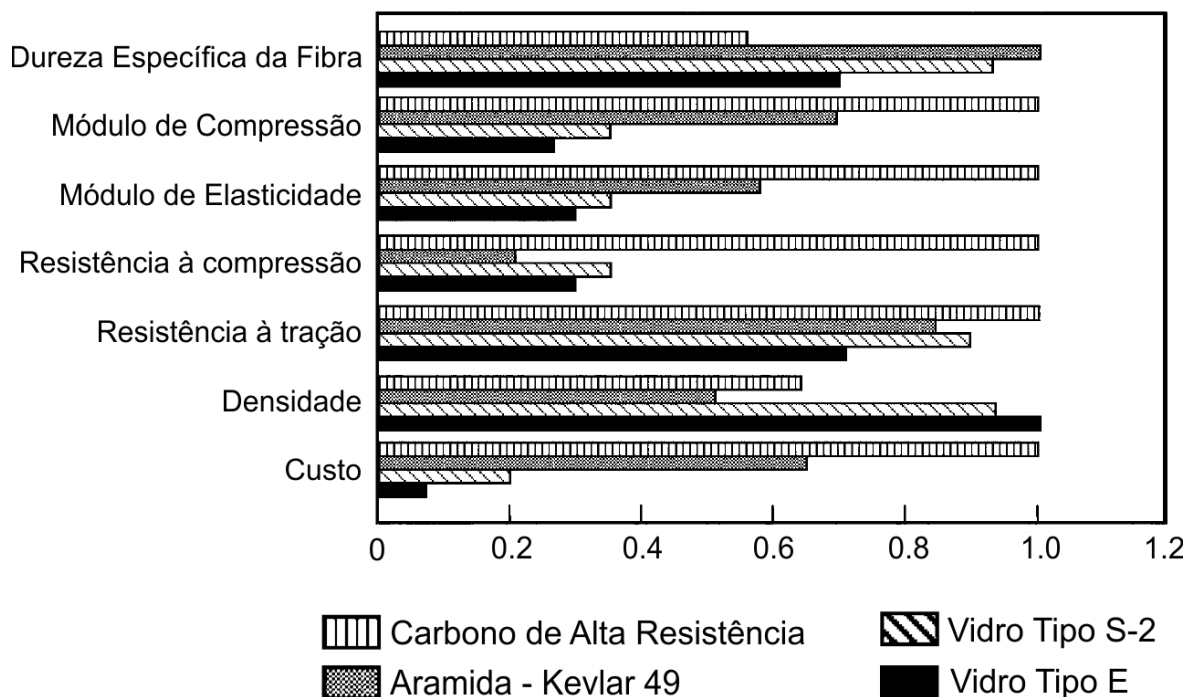


Figura 23. Custo e desempenho relativo de algumas fibras de alta resistência (CAMPBELL, 2010).

2.4.5. Fibras aramídicas

As fibras aramídicas (Figura 24), comumente conhecidas pelo seu nome comercial Kevlar®, foram as mais utilizadas da década de 70. Desde então têm sido constantemente melhoradas resultando em um material com ótimas propriedades de resistência ao desgaste, choque, variação de temperatura e abrasão, sendo uma das mais utilizadas atualmente. Elas consistem em cadeias de grupos amida e aromáticos arranjados em sequência, orientados paralelamente. Esse arranjo gera uma estrutura cristalina muito resistente.

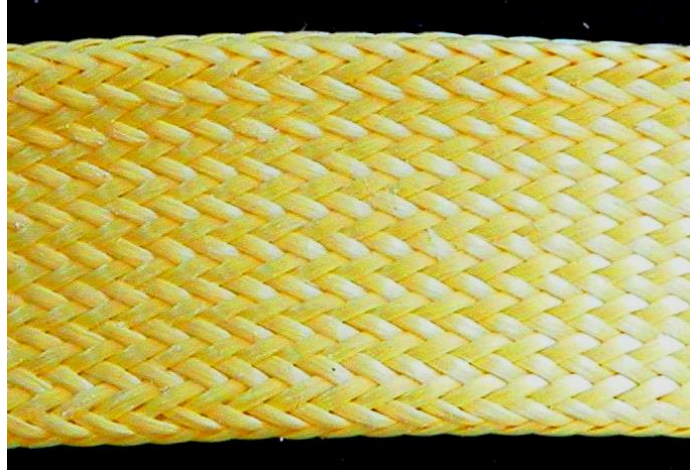


Figura 24. Material feito de Kevlar® (www.sollercomposites.com. Acesso em: 22 de maio 2015).

Atualmente quatro empresas produzem as fibras aramídicas, destacando-se a francesa DuPont, produtora do Kevlar®, que iniciou sua comercialização em meados de 1972. Ela foi introduzida no mercado inicialmente como um fio de filamentos contínuos denominados de fibra B para, posteriormente, ser comercializada como Kevlar 49 que era uma versão desta com alto módulo de elasticidade (BERNARDI, 2003). Desde então, vários tipos de Kevlar foram produzidos, para diferentes aplicações e necessidades. É possível observar as características de cada tipo na Tabela 3. Característica dos **tipos de Kevlar®** (BERNARDI, 2003).

Tabela 3. Característica dos tipos de Kevlar® (BERNARDI, 2003).

Tipo	Característica
Kevlar 29	Fio para todo tipo de aplicação
Kevlar 49	Fio de alto módulo
Kevlar 68	Fio de módulo moderado
Kevlar 100	Fio colorido
Kevlar 119	Fio alto alongamento
Kevlar 129	Fio de elevada tenacidade
Kevlar 149	Fio de ultra alto módulo

Atualmente as fibras aramídicas são comercializadas em diversas formas: segmentos curtos, polpa, tecidos e não tecidos. Cada um com propriedades

diferentes, onde cada um é usado de acordo com as necessidades da aplicação. A sua estrutura química constituída de anéis aromáticos forma uma estrutura com boas propriedades mecânicas ao longo de uma extensa variação térmica. Segundo Bernardi (2003), os polímeros possuem resistência à tração relativamente baixa (menor que 100 MPa), mas quando reforçados por fibras, esses valores crescem bastante. Eles geralmente possuem elevado alongamento na ruptura; elevada dureza; elevado módulo de elasticidade; alta resistência à compressão, fadiga, flexão, impacto fricção e abrasão. Segundo Yang (1994), as fibras aramídicas são mais resistentes à tração que o aço e as fibras de vidro.

A Tabela 4) apresenta as faixas de propriedades mecânicas do Kevlar®. É importante salientar que as propriedades das fibras podem variar bastante de acordo com o processo de fabricação o qual foi submetida.

Tabela 4. Propriedades mecânicas do Kevlar® (PERFORMANCE COMPOSITES LTD, 2009).

Densidade (kg/m ³)	E1 (GPa)	E2 (GPa)	ν
1400	30	30	0,20

Uma propriedade muito importante nas fibras aramídicas é sua baixa massa específica relativa. A Figura 25) apresenta um comparativo desta. É possível observar a grande diferença entre a massa específica aramida e os demais materiais, o que é um grande benefício já que no cálculo estrutural o peso do material é algo de suma importância.

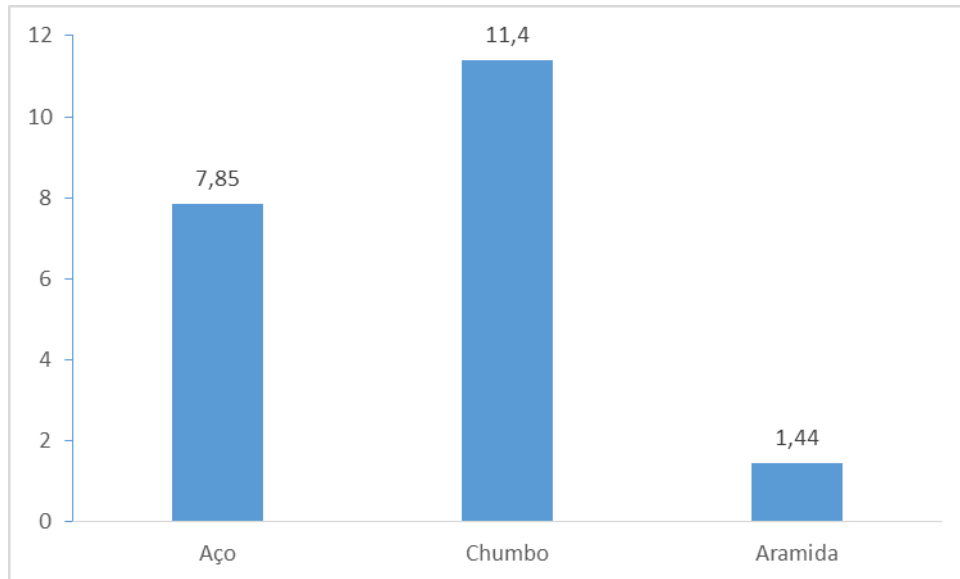


Figura 25. Comparativo de massa específica (g/cm³) (FELIPE, 2012).

2.5. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Este item apresenta uma descrição do método adotado, o método dos elementos finitos, assim como do *software* que será utilizado neste trabalho. Há ainda uma descrição dos tipos de simulações realizadas e justificativas de escolha das simulações.

Um modelo que define a resposta linear dinâmica de uma estrutura pode ser criado a partir da equação de equilíbrio dinâmico (Eq. $M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=p(t)$) (1).

$$M\ddot{x}+C\dot{x}+Kx=p(t) \quad (1)$$

Onde M , C e K são matrizes $n \times n$ de massa, rigidez e amortecimento, respectivamente, $p(t)$ é um carregamento de dimensão n e as variáveis \ddot{x} , \dot{x} e x são vetores de aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente, dos nós da estrutura, e possuem, também, dimensão n .

A Equação (1) é um modelo para o cálculo do equilíbrio dinâmico de um sistema de n equações de segunda ordem e com vários graus de liberdade.

2.5.1. Análise modal

Como parte do processo de certificação de pás para turbinas eólicas, recomenda-se determinar as frequências naturais e as taxas de amortecimento da

pá. Estas propriedades podem ser determinadas experimentalmente e também através de técnicas numéricas. Na análise modal, a estrutura é submetida a vibrações sem amortecimento, onde pretende-se encontrar as frequências naturais e os modos de vibração da estrutura. Assim, é possível simplificar a Eq. (1) para:

$$M\ddot{x}+Kx=0 \quad (2)$$

A variável x varia em função do tempo e pode ser definida pela Eq. (3).

$$x(t)=x(\omega)\text{sen}(\omega t+\theta) \quad (3)$$

A Equação 3 e sua derivada podem ser substituídas na Eq. (2), obtendo, assim, um sistema de equações lineares homogêneas, chamado de problema de autovetor e autovalor. A substituição resultará na Eq. (4).

$$\|K-\omega^2M\|x(\omega)=0 \quad (4)$$

Logo, pode-se extrair os n autovalores a partir da Eq. (5), onde estes representam as frequências naturais do sistema.

$$\|K-\omega^2M\|=0 \quad (5)$$

Encontradas as frequências naturais utilizando a Eq. (5), é possível encontrar todos os n modos de vibração do sistema.

É importante conhecer a frequência natural de vibração da estrutura, pois quando esta frequência coincide com a frequência de excitação externa da estrutura acontece um fenômeno chamado ressonância, onde a estrutura sofre deslocamentos excessivos que podem comprometer a integridade da estrutura ou, ainda, ocorrer um colapso da estrutura.

Logo, é imprescindível conhecer o comportamento da estrutura em projetos submetidos a carregamentos que variam ao longo tempo afim de encontrar e corrigir comportamentos indesejáveis da estrutura. Conhecendo a frequência natural, é possível modificar alguns parâmetros da estrutura, afim de evitar que esta trabalhe próximo da sua frequência natural, tais como geometria e espessura.

2.5.2. Análise harmônica

Na análise harmônica é possível determinar os modos de vibração que mais contribuem para a resposta dinâmica da estrutura. Logo, busca-se conhecer a

resposta dinâmica da estrutura quando esta recebe um carregamento senoidal que varia em função de uma faixa de frequência. O *software* ANSYS® disponibiliza três tipos de simulações harmônicas: a simulação completa, a reduzida e a simulação por superposição modal. A escolha da simulação varia de acordo com as necessidades e domínio do usuário.

A *simulação harmônica completa* utiliza todos os graus de liberdade da estrutura, assim como a translação e rotação, utilizando cargas que variam em uma faixa de frequência pré-determinada pelo usuário. Esse tipo de análise requer um maior custo computacional maior (VALE, 2006).

A *simulação harmônica reduzida* é uma adaptação da simulação completa, porém, neste caso somente os graus de liberdade translacionais, ou graus mestres, são considerados. Isso reduz consideravelmente o custo computacional da análise.

A *simulação harmônica por superposição modal* exige mais domínio por parte do usuário, porém gera melhores resultados. Para usar esse tipo de simulação, deve-se antes realizar uma análise modal da estrutura, desconsiderando qualquer amortecimento modal, tal como o método do *Bloco de Lanczos*, por exemplo. A partir dos resultados da análise modal, deve-se obter os coeficientes de participação modal, ou seja, que fazem com que a solução harmônica seja válida em toda a faixa de frequência analisada. A superposição modal é baseada justamente nesses coeficientes, afim de gerar uma resposta harmônica dentro da faixa de frequência a ser estudada (FURTADO, 2006).

2.5.3. Análise transiente

Na análise transiente é possível determinar parâmetros, tais como deslocamentos, esforços e tensões, que variam quando uma estrutura é submetida a um carregamento senoidal que varia em função do tempo.

Diferentemente da análise harmônica, na análise transiente é possível verificar a variação da resposta dinâmica da estrutura através de deslocamentos máximos referentes ao deslocamento inicial aplicado na estrutura. Os fenômenos os quais uma estrutura está submetida são, em termos reais, naturalmente transientes, logo é de suma importância considerar esse tipo de análise.

Sabe-se que a análise transiente é uma análise em função de um tempo t , logo é possível utilizar dois métodos para solucionar as equações de movimento anteriormente citadas, a integração numérica e o método da superposição modal.

2.5.3.1. Integração Numérica

Este método utiliza a Eq. (1) em uma faixa de tempo Δt garantindo o equilíbrio durante todo o intervalo de tempo. No tempo $t = 0$, os parâmetros de aceleração, velocidade e deslocamento são conhecidos, então deseja-se observar como esses parâmetros são modificados ao longo da análise. É possível estimar o Δt dividindo o T por n .

2.5.3.2. Método da Superposição Nodal

É possível utilizar este método em estruturas que possuam comportamento linear e amortecimento proporcional, quando deseja-se obter a resposta dinâmica da estrutura. Este método expressa a deformada da estrutura em modos normais de vibração em um espaço modal separando a Eq. (1) em novas equações independentes. Então obtém-se o resultado esperado superpondo as soluções das novas equações modais.

2.6. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF), segundo Pires (2010), é uma ferramenta utilizada em simulações estruturais, quando se deseja obter o comportamento de uma estrutura por meio de uma aplicação de cargas. Alguns passos para utilizar este método de análise são:

- Modelo geométrico computacional;
- Propriedades do material;
- Análise de modelo e resultados;
- Aperfeiçoamento e atualização dos modelos.

O modelo geométrico, quando simples, pode ser feito no mesmo *software* de análise, entretanto quando a geometria é complexa, geralmente criam-se modelos em um *software* CAD e exportam a geometria para o *software* de elementos finitos. O modelo adotado deve preencher aos requisitos de projeto, gerando resultados

relevantes ao interessado. Segundo Tong (2010), a maior parte da análise estrutural baseia-se na modelagem.

No *software* de elementos finitos são inseridas algumas propriedades do material, as condições de contorno do problema, um refinamento de malha da estrutura (Figura 26) e carregamentos em que a estrutura será submetida. O refinamento da malha está diretamente ligado à precisão nos resultados, porém geram uma análise mais lenta e que exige melhores computadores.

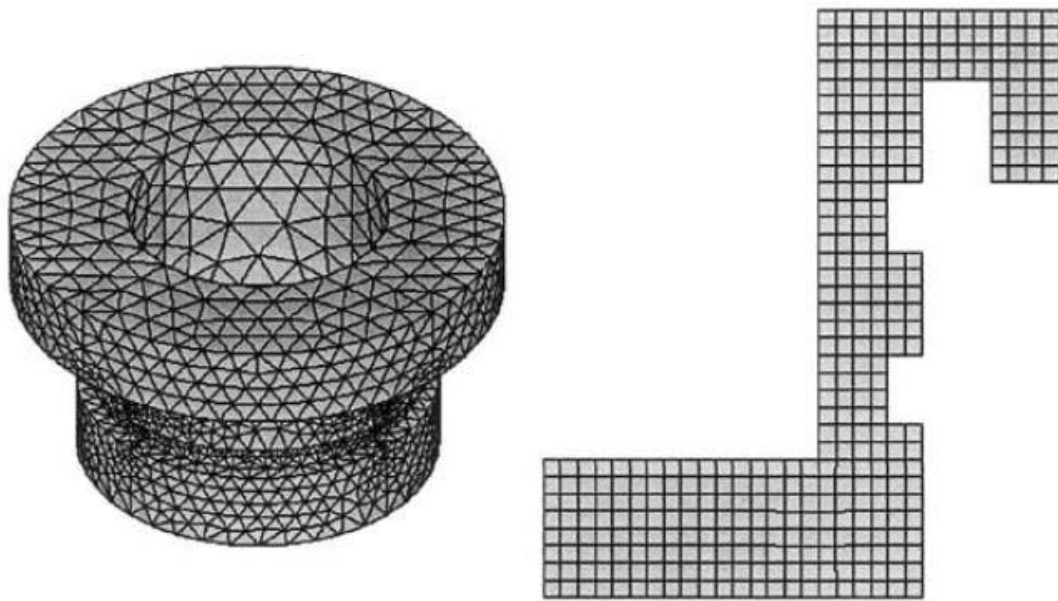


Figura 26. Exemplo de refinamento de malha 3D e 2D (MADENCI, 2006)

Após terminadas as análises, é possível obter resultados visuais ou numéricos, escolhidos de acordo com os critérios e necessidades do usuário. Nos resultados visuais é possível visualizar principalmente regiões de maiores e menores deformações e deslocamentos, e regiões que sofrem maior ou menor influência do carregamento. Já os resultados numéricos podem ser usados para cálculos de limite de resistência, gerar gráficos e tabelas e modificar o modelo ou redimensionar a estrutura a partir dos valores obtidos afim de obter melhores condições de economia e segurança (PIRES, 2010).

2.7. ESTADO DA ARTE

Os estudos ligados ao material que a torre e as pás do aerogerador são construídos têm sido intensificados nos últimos anos. Atualmente, existem na literatura diversas análises mecânicas relacionadas à pá do aerogerador, tanto

experimentais quanto computacionais. Este capítulo apresenta alguns estudos da área, revelando a grande importância do estudo deste tema.

Araújo (2014) utiliza uma modelagem em elementos finitos de viga com proporções geométricas equivalentes à pá de um aerogerador afim realizar uma análise modal no *software* ANSYS®. Optou-se pelo elemento de viga devido à complexidade da geometria da pá, de contínuas variações dimensionais ao longo de seu comprimento. A geometria utilizada foi importada de um arquivo do tipo CAD. O autor adotou uma pá de formato sólido HTUC de aço inox 304 e com 4,49 metros de comprimento.

Foi utilizado no ANSYS® o elemento BEAM188 que possui 6 graus de liberdade. É importante conhecer os períodos em que a pá pode naturalmente entrar em ressonância, logo, seu objetivo era extrair algumas propriedades dinâmicas deste modelo, tais como frequências naturais e modos de vibração, afim de identificar possíveis ressonâncias na estrutura, e com isso demonstrar a eficácia do uso de elemento de viga para simular a pá da turbina. Após análise modal, o autor pôde verificar a eficácia do elemento de viga BEAM188 que apresentou resultados satisfatórios.

Pires (2010) apresenta uma simulação computacional da estrutura de uma pá de turbina de pequeno porte utilizando elementos finitos, utilizando as propriedades das fibras de vidro com matriz epóxi. Na modelagem, o autor privilegiou os aspectos aerodinâmicos da pá afim de obter uma melhor conversão da energia cinética em elétrica. Foi possível observar que a espessura da parede da pá é inversamente proporcional ao deslocamento na extremidade da pá, ou seja, quanto maior a espessura, menor foi o deslocamento da extremidade em balanço da pá (com a outra extremidade estando engastada). O autor observou ainda que os modos de falha na matriz tendem a ser os dominantes, sendo que não houve, para as espessuras e velocidades de vento testadas, falhas na direção das fibras.

Filho (2012) realiza um estudo probabilístico qualitativo e quantitativo relacionado às variações de regime de ventos e tipos e dimensões de turbinas. Para tal, Filho propõe uma análise estrutural levando em conta as incertezas as quais a estrutura está exposta e, utilizando para tal, o método dos elementos finitos. Para determinar as variações estatísticas foi adotado o método probabilístico de Monte Carlo para espessura, densidade e módulo de elasticidade da turbina eólica, afim de

determinar o efeito das variações nos testes. Foi possível observar que grandes alterações ocorrem em altas frequências. Foi possível ainda observar em testes que as propriedades que mais influenciam a resposta dinâmica da turbina são a massa específica e o módulo de elasticidade. A espessura também influencia, porém com ordem de grandeza diferente. Foram obtidas ainda as frequências naturais que devem ser analisadas na fabricação da turbina.

O autor pôde concluir que é muito importante considerar os fatores estatísticos nas análises e fabricação de turbinas, considerando ainda os locais onde serão instaladas. É importante ainda, desenvolver estudos que reduzam a incerteza nos valores encontrados teoricamente, pois há outros problemas, como por exemplo a fadiga, que são eventos aleatórios que podem comprometer a pá antes do tempo previsto para sua vida útil. Logo, é recomendável um estudo probabilístico de todas as variáveis de fabricação e de ventos locais existentes, afim de melhorar a segurança da turbina e do projeto.

Chen (2012) realiza um estudo de otimização estrutural de pás de turbinas eólicas utilizando material compósito. Para tal, ele utiliza uma mistura de elementos finitos e um algoritmo de otimização por enxame de partículas. O algoritmo de técnica de otimização por enxame de partículas, segundo Caraciolo (2009), é um algoritmo que possui uma população de partículas, onde cada partícula representa uma possível solução para o problema de otimização. Cada partícula do exame pode ser representada por um objeto que possui associado a ele um vetor posição, isto é, a posição da partícula no espaço de busca, e um vetor velocidade, responsável por guiar as mudanças da posição das partículas durante a execução do processo. O autor observou, a partir de pesquisas bibliográficas, o déficit de informações quanto à influência do peso da pá nos resultados das análises mecânicas. Logo, objetivo do autor é analisar a interferência do peso da pá nas propriedades desta. Para isso, busca-se minimizar o peso, que é causado principalmente pela espessura da pá, além disso, o custo do material da pá é algo relevante e uma pá mais leve resulta em uma menor fadiga. Além da espessura, foi estudada também a localização das longarinas ao longo da pá. O autor pôde concluir que este tipo de estudo leva a reduções significativas de peso da pá, o que é economicamente e mecanicamente importante.

Yang (2012) realiza um teste em uma pá real de 40 metros de comprimento afim de comparar as previsões numéricas com a verdadeira resposta da pá, para, então, validar os modelos de previsão e, ainda, obter uma melhor compreensão da sequência de acontecimentos que conduzem ao colapso da pá em um caso real. A pá real foi fabricada com fibras de vidro de matriz epóxi. No cálculo numérico foram consideradas características não-lineares para a geometria da pá, já que esta possui uma deformação complexa quando submetidas às cargas dos ventos. Os testes destrutivos mostraram uma deformação na ponta da pá de 11 metros e mostraram que a carga final aplicada foi de 160% da carga máxima de projeto. As primeiras falhas ocorreram próximo à metade do comprimento da pá...

Schubel (2012) realiza um estudo da atual situação dos estudos acerca do design de pás de turbina eólica, incluindo eficiência teórica e prática, propulsão e cargas. Seu foco se dá nas turbinas de eixo horizontal, já que esta é a predominante no mercado eólico. Foram detalhados os princípios de design aerodinâmico, como ângulo de ataque, aerofólio e comprimento da pá. Foram ainda revisados os perfis aerodinâmicos, gravitacionais, centrífugos e as condições operacionais. Em seu estudo, foi constatado que, por razões de eficiência, controle de ruído e estética, o mercado eólico é dominado pelas turbinas de eixo horizontal de três pás. Essa tecnologia internacional tem evoluído bastante em torno desse tipo de projeto e provavelmente permanecerá assim nos próximos anos. Haja vista que o comprimento da pá está diretamente ligado à potência da turbina, o diâmetro varrido pelo rotor tem se tornado maior, com os mais recentes modelos chegando a 164 metros de diâmetro. A estética é um papel menos importante quando comparada com o comprimento e *design* da pá. Suas análises revelam que a pá pode ser modelada como uma viga simples engastada na extremidade e um carregamento distribuído pode ser usado para representar a elevação aerodinâmica durante o funcionamento da turbina. O crescente momento fletor indica que os requisitos estruturais irão determinar o formato da pá, especialmente nas áreas próximas ao rotor, que exigem aumento de espessura.

Campos (2013) desenvolve um modelo de pá de aerogerador e realiza uma análise computacional via CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para determinar o carregamento aerodinâmico da pá utilizando propriedades de dois materiais compósitos de matriz epóxi afim de comparar os resultados obtidos com cada

compósito, sendo eles reforçados com a fibra de carbono e a fibra de vidro. O autor teve interesse em avaliar a viabilidade da fibra de carbono no setor eólico, comparando-a com a fibra de vidro. Para os cálculos estruturais usou-se o critério de falha por tensão máxima. Foi realizada uma comparação de peso da pá onde a pá de fibra de carbono apresentou 45% do peso da pá de fibra de vidro. Foram realizados também ensaios estáticos com diversas porcentagens de carga de projeto e as deflexões obtidas foram comparadas com os valores obtidos nas simulações numéricas por elementos finitos. Os valores de deflexão medidos apresentaram-se próximos dos valores calculados. A partir das análises, foi possível confirmar que a baixa densidade, combinada com elevadas propriedades mecânicas das fibras de carbono são atrativas para a produção de pás de aerogeradores de grande porte.

3 RESULTADOS NUMÉRICOS PRELIMINARES

Como citado no capítulo de Metodologia, Tong (2010) admite que é possível utilizar modelagens de viga para simulações computacionais preliminares de pás de aerogeradores, obtendo-se desta forma uma noção do comportamento global da pá.

O modelo simplificado de uma pá eólica adotado é uma placa engastada em somente um dos bordos, com as dimensões apresentadas na Figura 27).

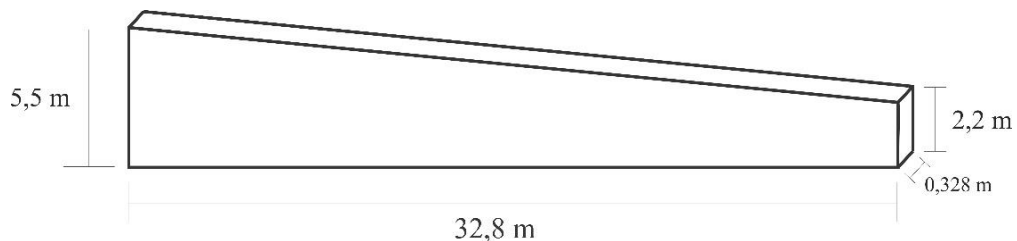


Figura 27. Modelo simplificado da pá

Uma modelagem desta estrutura foi feita no ANSYS® utilizando o elemento SHELL63. Inicialmente foi realizada uma análise modal de onde foram extraídas as frequências naturais apresentadas na Tabela 5). Comparando os dois materiais, Kevlar® e fibras de vidro, verifica-se que as duas primeiras frequências se aproximam, havendo maior discrepância nos valores obtidos para as frequências mais altas. Vale ressaltar que na análise com fibras de vidro o ANSYS® requiere alguns dados adicionais, pois o material é ortotrópico, logo, devido à ausência de alguns valores na bibliografia considerada nas análises, foram estimados valores razoavelmente de:

- E3: 1GPa
- G23: 1KPa
- G31: 1KPa

O módulo de elasticidade estimado foi de 3,33% do valor do módulo na direção X. Já os valores de módulo de elasticidade transversal foram estimados em 0,000025% do valor do mesmo na direção XY. Estes valores foram estimados dessa maneira afim de manter a segurança nos resultados.

Tabela 5. Frequências naturais

Modo	Frequência (Hz)	
	Kevlar®	Fibras de vidro
1	0,29775	0,23476
2	1,5597	1,231
3	4,1413	2,8115
4	4,2087	3,2725

Em seguida foi realizada uma análise harmônica variando-se o intervalo de frequência de 0 a 5 Hertz e utilizando a *simulação harmônica completa*. A placa foi discretizada em uma malha com 816 nós, e em cada um deles é aplicada uma força de 1 Newton, configurando um carregamento total de 816 Newtons. A Figura 28) mostra a direção do carregamento na placa.

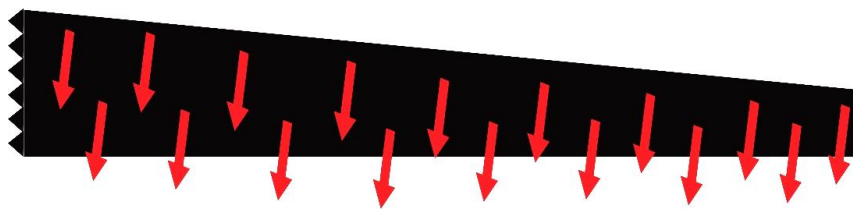


Figura 28. Direção do carregamento distribuído na placa

Os modos de vibração da análise modal realizada no modelo foram extraídos do ANSYS® e estão mostrados nas figuras a seguir.



Figura 29. Primeiro modo de vibração

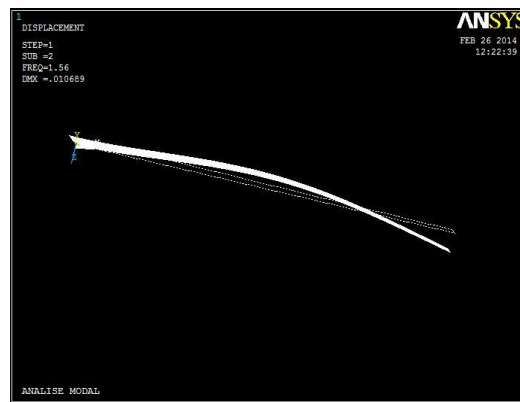


Figura 30. Segundo modo de vibração

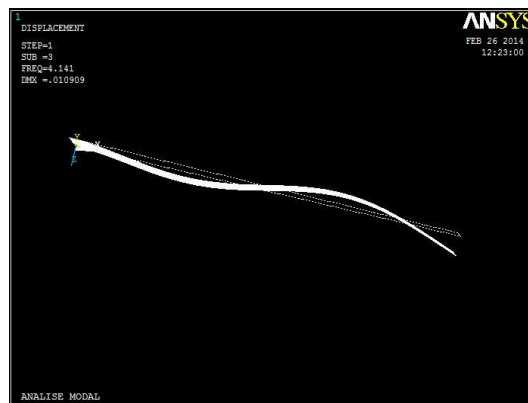


Figura 31. Terceiro modo de vibração

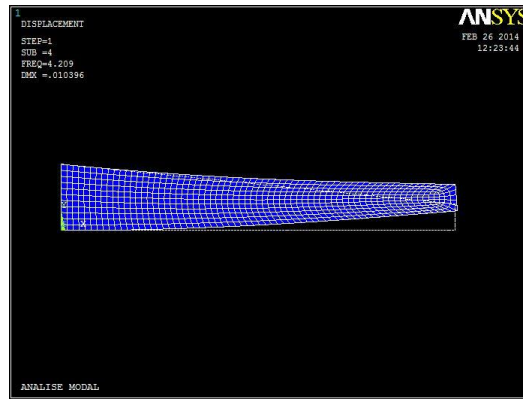


Figura 32. Quarto modo de vibração

A resposta em frequência do nó da extremidade da placa, considerando cada um dos materiais é apresentada nas Figura 33)(a) e Figura 33)(b). Verifica-se que o harmônico associado à primeira frequência é o mais influente na resposta para os dois materiais apresentados. Percebe-se, no entanto, que a amplitude da resposta permanente que corresponde ao primeiro pico é menor para o caso da fibra de vidro do que para o caso do Kevlar®.

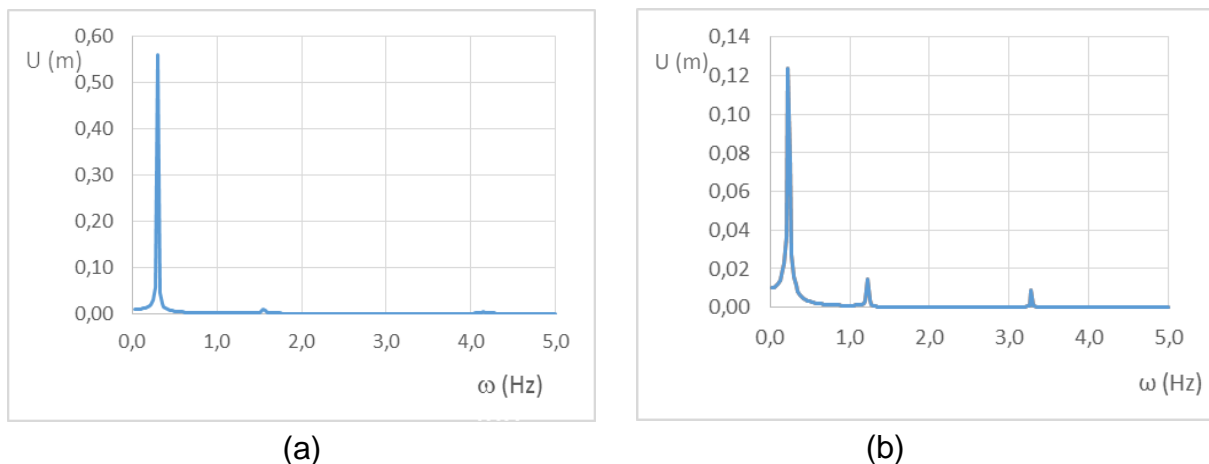


Figura 33. Resposta em frequência do nó da extremidade da placa: (a) Kevlar; (b) Fibra de vidro

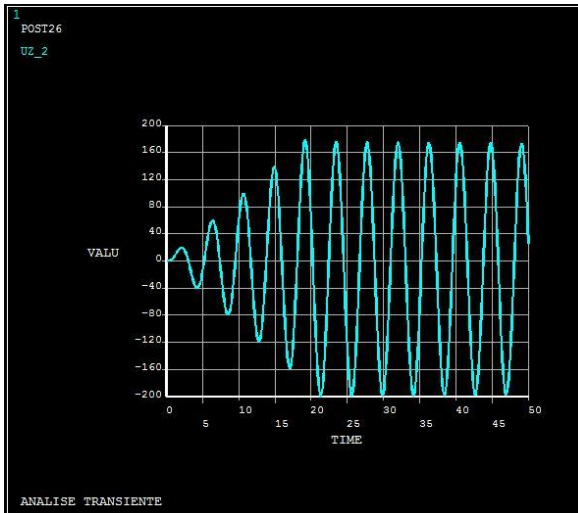
Por último foi realizada uma análise transiente sem amortecimento, considerando um carregamento harmônico senoidal conforme a Eq. (6) e com um tempo de análise de 30 segundos.

$$\text{Carga} = 1000 * \text{sen} (2 * \pi * f * t) \quad (6)$$

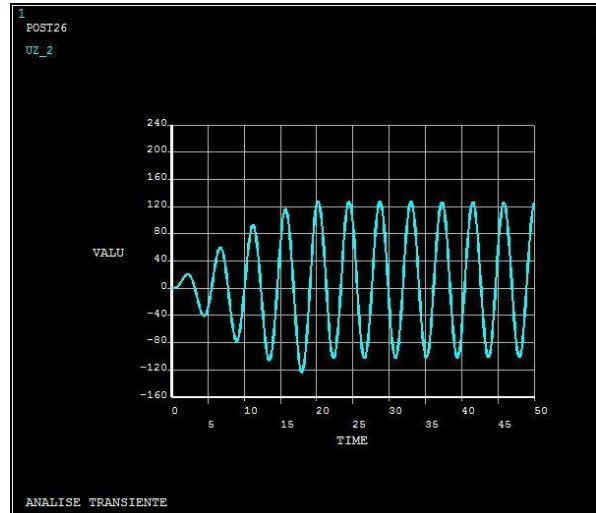
Onde f é a frequência e t é o tempo de análise.

A Figura 34(a) apresenta a evolução do deslocamento no tempo de um nó na extremidade da pá, considerando compósito Kevlar® e uma frequência de

forçamento de 90% da frequência fundamental. Os mesmos resultados são apresentados na Figura 34)(b) para o caso do compósito fibra de vidro, considerando também uma frequência de forçamento de 90% da frequência fundamental. Conforme observado na resposta em frequência, a evolução da resposta no tempo também apresenta amplitudes de deslocamentos maiores para o caso do compósito Kevlar®.



(a)



(b)

Figura 34. Evolução no tempo do deslocamento do nó da extremidade da pá. (a) Kevlar®; (b) Fibra de vidro

4 CONCLUSÃO PARCIAL

O presente trabalho apresenta uma modelagem simplificada de uma pá de uma turbina eólica a fim de realizar uma análise dinâmica deste tipo de estrutura através do método de elementos finitos utilizando o pacote computacional ANSYS®. Foram considerados dois materiais compósitos com propriedades ortotrópicas, as fibras aramídicas (Kevlar®) e a fibra de vidro. O modelo simplificado adotado é uma placa engastada em somente um dos bordos. Comparando-se os dois tipos de material verifica-se que as duas primeiras frequências se aproximam, havendo maior discrepância nos valores obtidos para as frequências mais altas. A partir da análise harmônica realizada, verifica-se que o harmônico associado à primeira frequência é o mais influente na resposta para os dois materiais apresentados. Percebe-se, no entanto, que a amplitude da resposta permanente que corresponde ao primeiro pico é menor para o caso da fibra de vidro do que para o caso do Kevlar®. O mesmo observa-se nos resultados no domínio do tempo. Vale ressaltar que se trata de um estudo preliminar, com vistas à modelagem de uma pá eólica com suas dimensões reais características para o Trabalho de Conclusão de Curso 2.

5 PRÓXIMAS ETAPAS

- 1 Modelagem via elementos finitos de uma pá real de 2 metros de comprimento, afim de realizar análise modal harmônica e transiente.
- 2 Comparação dos resultados numéricos da análise modal com os resultados experimentais da pá.
- 3 Adequação do modelo numérico a partir dos resultados experimentais, afim de obter um resultado numérico próximo ao dos experimentos com a pá real.
- 4 Redação do texto final e correções sugeridas pela banca examinadora.

6 CRONOGRAMA

	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO
1					
2					
3					
4					

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, D. C.; MORAIS, M. V. G.; ÁVILA, S. M. “Análise Modal de Uma Pá de Turbina Modelada Como Elemento de Viga Utilizando a Plataforma Ansys”, In: IMERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 35., 2014, Fortaleza. Artigo. Fortaleza: Evandro Parente Jr, 2014. p. 1 - 5.
- BERNARDI, Stefania Tesi. “Avaliação do Comportamento de Materiais Compósitos de Matrizes Cimentícias Reforçadas com Fibra de Aramida Kevlar”, 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- BRASIL. “Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social Setorial”, Rio de Janeiro, n. 29, p. 229-278, mar. 2009. Disponível em: <web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2183/1/BS%2029%20Um%20panorama%20da%20ind%C3%BAstria%20de%20bens%20de%20capital_P.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2014.
- BURTON, T., *et al*, 2001. “Wind Energy Handbook”, Wiley, New York, 377-380.
- CALLISTER, W.D., “Materials Science and Engineering: An Introduction, Interactive MSE”, 4th edition, New York: John Wiley & Sons, 1997, ISBN: 978-0-471-16867-6.
- CALLISTER, W.D., “Materials Science and Engineering: An Introduction”, Canadá: John Wiley & Sons, 2000.
- CAMILLO, E. V. “As políticas de inovação da indústria de energia eólica: uma análise do caso brasileiro com base no estudo de experiências internacionais”, Campinas: UNICAMP, 2013. Tese de doutorado.
- CAMPBELL, F. C. “Structural Composite Materials”, Ohio: Asm International, 2010. 612 p.
- CAMPOS, Maxdavid Oliveira. “Estudo Comparativo de Pás Para Aerogeradores de Grande Porte Fabricadas em Materiais Compósitos Reforçadas com Fibra de Carbono ou Fibra de Vidro”. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Cap. 6.
- CARACIOLO, Marcel. “Introdução à Inteligência de Enxame: Otimização por Enxame de Partículas (PSO). 2009”, Disponível em: <<http://aimotion.blogspot.com.br/2009/04/introducao-inteligencia-de-enxame.html>>. Acesso em: 24 mar. 2015.
- CARVALHO, A. “Fiberglass x Corrosão: Especificação, Instalação e manutenção de equipamentos de Fiberglass para Ambientes Agressivos”, ASPLAR, 425 p., São Paulo, 1992.
- CAVALCANTI, Wilma Sales. “Compósitos Poliéster/tecidos Tramados Vegetal-vidro: Caracterização Mecânica e Simulação da Sorção de Água”, 2006. 122 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2006.
- CRESESB, 2008. “Energia Eólica – Princípios e Tecnologias”, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Disponível em: www.cresesb.cepel.br/download/tutorial/tutorial_eolica_2008_e-book.pdf. Acesso em: 11 nov. 2014.
- DARRIEUS, G.J.M., 1929, “Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current”, U.S. Patent 1 835 018, Oct, 1926.
- DELGADO, M. A. P. “A Expansão da Oferta de Energia Elétrica pela Racionalidade do Mercado Competitivo e a Promessa da Modicidade Tarifária”, Rio de Janeiro:

- COPPE/UFRJ, 2003. Tese de Doutorado (Programa de Planejamento Energético).
- FELIPE, Renata Carla Tavares dos Santos. !Envelhecimento Ambiental Acelerado em PRF à Base de Tecidos Híbridos Kevlar/Vidro: Propriedades e Instabilidade Estrutural!, 2012. 81 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.
- FLINN, R.; TROJAN, P., "Engineering materials and their applications", Houghton Mifflin Company, Boston, 1981.
- FURTADO, Gilton Carlos de Andrade. "Análise Dinâmica, Através do Método de Elementos Finitos, de um Compensador Síncrono de 150MVAR de Fabricação Alstom". 2006. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006. Cap. 7.
- LEANDRO FILHO, Francisco de Assis. "Avaliação Estrutural de Sistemas de Geração de Energia Eólica de Pequeno Porte Utilizando Métodos Estocásticos", 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- LEITE, Carolina Gonçalves Coelho Laurindo. "Desenvolvimento e Caracterização de Tubos Compósitos Para Aplicação em Risers Rígidos", 2011. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- MADENCI, E., GUVEN, I. "The Finite Element Method and Applications In Engineering Using ANSYS®". New York: Springer, 2006. 686 p.
- MALLICK, P. K., 2007, "Fiber-Reinforced Composites, Materials, Manufacturing, and Design". 3 ed. Michigan, LLC.
- MALHOTRA P., *et al.* "A review and design study of blade testing systems for utility: Scale wind turbines". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2012. 16:284–92.
- MANO, E. B. "Polímeros como materiais de engenharia", São Paulo: Edar Blucher, 2 ed., 2000.
- MARGEM, Jean Igor. "Estudo das Características Estruturais e Propriedades de Compósitos Poliméricos Reforçados com Fibras de Malva", 2013. 134 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2013.
- MARQUES, J., *et al.* "A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System", In: 6º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP'02, v. 1, pp. 732-738, 2002.
- ØRENSEN, Bent F et al. "Blade Materials, testing methods and structural design", In: TONG, Wei. Wind Power Generation and Wind Turbine Design. Radford: Wti Press, 2010. p. 1-725.
- PARASCHIVOIU, I., 2009. "Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept", 1st ed. Canada: Polytechnic International Press.
- PAVINATTO, E. F. 2005. "Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão da parques eólicos à rede elétrica". Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- PEIXOTO, Luciana de Souza. "Preparação de Compósitos e Nanocompósitos Poliméricos *in situ*", 2012. 234 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia

- Química, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- PERFORMANCE COMPOSITES LTD (Taunton). “Mechanical Properties of Carbon Fibre Composite Materials: Fibre / Epoxy resin (120°C Cure)”. 2009. Disponível em: <www.performance-composites.com>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- PINTO, M., 2013. “Fundamentos de Energia Eólica”, LTC, Rio de Janeiro, White J.R.
- PIRES, Julio Cesar Pinheiro. “Estudo de Rotor Para Turbina Eólica de Eixo Horizontal de Pequeno Porte com Aplicação de Modelagem e Simulação Virtual”, 2010. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design, Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Cap. 6.
- RIO DE JANEIRO. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014”. 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 15 maio 2014.
- SAVONIUS, S.J., “Rotor adapted to be driven by wind or flowing water”, US Patent no. 1 697 574, August, 1929.
- YANG, Jinshui et al. “Structural investigation of composite wind turbine blade considering structural collapse in full-scale static tests”. Elsevier: Composite Structures. China, p. 15-29. 23 nov. 2012.
- SCHUBEL, P.j. & Crossley, R. J., 2012. “Wind turbine Blade Design”, Faculty of Engineering, Division of Materials”, Mechanics and Structures, University of Nottingham, University Park, Nottingham NG7 2RD, UK.
- SILVA, N. F. “Fontes de energia renováveis complementares na expansão do setor elétrico brasileiro: o caso da energia eólica”, Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. Tese de doutorado em ciências e planejamento energético. 263 p., 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Planejamento Energético, 2006).
- VALE, Alan Rafael Menezes. “Controle de vibração em reatores elétricos através de absorvedores dinâmicos viscoelásticos. 2006. 210f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.
- VENTURA, Ana Mafalda F.M. “Os Compósitos e a sua aplicação na Reabilitação de Estruturas metálicas”, C.Tecn. Mat., Lisboa, v. 21, n. 3-4, jul. 2009. Disponível em <www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0870-83122009000200003&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 05 mar. 2015.
- WENDEL, Guilherme München. “Projeto Aerodinâmico de Pas de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal”. 2007. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Cap. 11.
- YANG, J.S., Peng C.Y., Xiao J.Y., Zeng J.C., Xing S.L., Jin J.T., 1994, “Structural investigation of composite wind turbine blade considering structural collapse in full-scale static test”, Composite Structures, 97, 15-29, 2013. Goossens, M., Mittelbach, F., & Samarin, A., *The LaTeX Companion*. Addison-Wesley.

ANEXOS

Anexo I	Listagem De Códigos Do ANSYS® Para Análise Modal	49
Anexo II	Listagem De Códigos Do ANSYS® Para Análise Harmônica	51
Anexo III	Listagem De Códigos Do ANSYS® Para Análise Transiente	53

ANEXO I: Listagem De Códigos Do ANSYS® Para Análise Modal

FINISH
/CLEAR

/PREP7
/TITLE, ANALISE MODAL

L = 32.8 !comprimento da viga
A = 0.573
B = 3.0

k,1,0 !criando nós e área
k,2,L
k,3,0,5.5
k,4,32.8,2.2
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3
A,P51X !finalizando area

ET,1,SHELL63 !tipo de elemento
R,1,0.328 !espessura da placa

MPTMP,,,,,,,, !dados do material
MPTMP,1,0
MPDATA,EX,1,,40e9
MPDATA,EY,1,,8 e9
MPDATA,EZ,1,,1e6
MPDATA,GXY,1,,4e9
MPDATA,PRXY,1,,0.34
MPDATA,PRYZ,1,,0.34
MPDATA,PRXZ,1,,0.34
MPTMP,,,,,,,,
MPTMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1900

FLST,2,1,5,ORDE,1 !criando e configurando malha
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.5,
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1

```
CMDELE,_Y  
CMDELE,_Y1  
CMDELE,_Y2  
FINISH
```

```
/SOLU  
ANTYPE,2
```

```
MODEOPT,LANB,4           !quatro modos de extração  
EQSLV,SPAR  
MXPAND,0, , ,0  
LUMPM,0  
PSTRES,0
```

```
MODEOPT,LANB,4,0,5, ,OFF !frequencia de 0 a 5 Hz  
FLST,2,1,4,ORDE,1  
FITEM,2,4
```

```
!DL,P51X, ,ALL,  
!FLST,2,816,1,ORDE,2  
!FITEM,2,1  
!ITEM,2,-816           !816 nos
```

```
/GO  
!F,P51X,FZ,1           !Forca de N Newtons em cada no  
/STATUS,SOLU  
SOLVE  
FINISH
```


ANEXO II: Listagem De Códigos Do ANSYS® Para Análise Harmônica

```

FINISH
/CLEAR

/PREP7
/TITLE, ANALISE HARMONICA

L = 32.8                !comprimento

k,1,0                  !criando nós e área
k,2,L
k,3,0,5.5
k,4,L,2.2
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3
A,P51X                !finalizando área

ET,1,SHELL63          !tipo de elemento
R,1,0.328              !espessura da placa

MPTEMP,,,,,,,,        !dados do material
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,40e9
MPDATA,EY,1,,8 e9
MPDATA,EZ,1,,1e6
MPDATA,GXY,1,,4e9
MPDATA,PRXY,1,,0.34
MPDATA,PRYZ,1,,0.34
MPDATA,PRXZ,1,,0.34
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1900

FLST,2,1,5,ORDE,1    !criando e configurando malha
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.5,
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL,,,1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y

```

```
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
FINISH
```

```
/SOLU
ANTYPE,3           !analise harmonica
HROPT,FULL
HROUT,ON
LUMPM,0
EQSLV, ,1e-008,
PSTRES,1           !considerar o pre-stress
```

```
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,4
```

```
/GO
DL,P51X, ,ALL, ,
FLST,2,816,1,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-816       !existem 816 nos, os quais sofrerao aplicacao da forca
!*
```

```
/GO
F,P51X,FZ,1,       !forca de 10 newtons em cada no
```

ANEXO III: Listagem De Códigos Do ANSYS® Para Análise Transiente

```

FINISH
/CLEAR

/PREP7
/TITLE, ANALISE TRANSIENTE

L = 32.8                !comprimento

k,1,0                  !criando area
k,2,L
k,3,0,5.5
k,4,L,2.2
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,4
FITEM,2,3
A,P51X                !finalizando area

ET,1,SHELL63          !tipo de elemento
R,1,0.328             !espessura da placa

MPTEMP,,,,,,,,        !dados do material
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,30e9
MPDATA,EY,1,,30e9
MPDATA,EZ,1,,1e6
MPDATA,PRXY,1,,0.34
MPDATA,PRYZ,1,,0.34
MPDATA,PRXZ,1,,0.34
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,1400

FLST,2,1,5,ORDE,1    !criando e configurando malha
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.5,
MSHKEY,0
CM,_Y,AREA
ASEL,,,1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2

```

FINISH

/CONFIG, NRES, 5000 !Aumentar numero maximo de iterações do ANSYS
(padrao = 1000)

/SOLU
ANTYPE,TRANS
TRNOPT,FULL
LUMPM,0

OUTRES,ALL,all !todos os itens da solução serao armazenados
!para todos os instantes de tempo

DELTIM,1E-1 !Passo da analise de 0,01 segundos
ALPHAD,0 !Amortecimento proporcional a massa
BETAD,0 !Amortecimento proporcional a rigidez

*DIM,CARGA,TABLE,20000,1,1,TIME
*DO,CONTADOR,1,2000
*SET,TEMPO, (CONTADOR-1)*1E-2 !O tempo é computado de 0; 0,01;
0,02...20s. O calculo eh feito a cada 0,001s
*SET,CARGA(CONTADOR,0,1) , TEMPO
*SET,CARGA(CONTADOR,1,1) , 10000*SIN(2*3.14*0.268*TEMPO) !f eh 90 por
cento da frequencia
*ENDDO

DL,4, ,ALL, !Engaste da viga

!F, ALL, FZ, %carga% !Carregamento nos 816 nos
SFA,1,1,PRES, %CARGA%

TIME,50 !Tempo de analise

SOLVE
FINISH
/POST26
FILE,'file','rst','!
/UI,COLL,1
NUMVAR,200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
FILLDATA,191,,,1,1
REALVAR,191,191
!*
NSOL,2,2,U,Z, UZ_2
STORE,MERGE
XVAR,1
PLVAR,2,