

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
FACULDADE DE ARQUITETURA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN  
PGDESIGN**

**ESTUDO DE ROTOR PARA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE  
PEQUENO PORTE COM APLICAÇÃO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIRTUAL**

**JULIO CESAR PINHEIRO PIRES**

**Porto Alegre**

**2010**

P667e Pires, Júlio Cesar Pinheiro

Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual / Júlio Cesar Pinheiro Pires. – 2011.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Branca Freitas de Oliveira

1. Energia eólica. 2. Elementos finitos. 3. Simulação computacional. 4. Modelagem geométrica. 5. Design industrial. I. Oliveira, Branca Freitas de, orient. II. Título.

CDU-744(043)

**JULIO CESAR PINHEIRO PIRES**

**ESTUDO DE ROTOR PARA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE  
PEQUENO PORTE COM APLICAÇÃO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIRTUAL**

Dissertação apresentada ao Programa Pós-graduação em Design PgDesign da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design, modalidade acadêmica, na área de Design Virtual.

**ORIENTADORA:** Prof. Dra. Branca Freitas  
de Oliveira

Porto alegre

2010

**JULIO CESAR PINHEIRO PIRES**

**ESTUDO DE ROTOR PARA TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL DE  
PEQUENO PORTE COM APLICAÇÃO DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO VIRTUAL**

Esta dissertação de foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Design na modalidade acadêmica e aprovada em sua forma final pela Orientadora e pela banca examinadora designada pelo programa de Pós-Graduação em Design - PgDesign da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

**Prof. Branca Freitas de Oliveira, Dra.**  
Orientadora PgDesign/UFRGS

---

**Prof. Wilson Kindlein Junior, Dr.**  
Coordenador PgDesign/UFRGS

**Banca examinadora:**

---

**Professora Adriane Prisco Petry, Dra.** em engenharia mecânica / UFRGS. Professora na graduação e pós-graduação UFRGS (DEMEC/UFRGS).

---

**Professor Fabio Gonçalves Teixeira, Dr.** em engenharia mecânica com ênfase em computação gráfica e modelagem geométrica / UFRGS. Professora na graduação e pós-graduação UFRGS (PgDesign/UFRGS).

---

**Professor José Luis Farinatti Aymone, Dr.** em engenharia civil / UFRGS. Professor na graduação e pós-graduação UFRGS (PgDesign/UFRGS).

Aos meus filhotes Dot e Meg. À minha  
Esposa Márcia pelo apoio e paciência em  
Todos os momentos

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha professora orientadora Branca Freitas de Oliveira, não apenas por este trabalho, mas por orientar minha carreira acadêmica na UFRGS com dedicação e profissionalismo. Quando colocado seu conhecimento a disposição do aluno, torna-se possível ir mais longe.

Ao professor Fábio Gonçalves Teixeira pelo apoio desde meu ingresso na UFRGS.

Ao professor José Luis Farinatti Aymone também pelo apoio e por aceitar participar da banca examinadora.

À professora Adriane Prisco Petry pelos assessoramentos que ajudaram a construir este trabalho.

Aos demais integrantes do VID – Virtual Design UFRGS por colaborarem de alguma forma com esta pesquisa.

Aos demais professores e funcionários do PgDesign Pós-graduação em Design e Tecnologia, representados pelo coordenador professor Wilson Kindlein Júnior.

Aos Bolsistas em iniciação científica Gabriel Birck e Anderson Peccin da Silva por sua colaboração nas análises numéricas.

Aos meus pais Ricardo e Cleonice e às minhas irmãs.

Ao CNPq, a CAPES e a PROPESQ/UFRGS pelo suporte financeiro para realização dessa pesquisa.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	17
1.2. PROBLEMA .....	20
1.3. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS .....	20
1.4. JUSTIFICATIVA .....	22
1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	23
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>24</b>
2.1. HISTÓRICO SOBRE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA .....	24
2.1.1. Energia da biomassa.....	25
2.1.2. Energia de combustíveis fósseis.....	26
2.1.3. Energia nuclear.....	27
2.1.4. Energia de fontes alternativas.....	27
2.2. ENERGIA EÓLICA .....	28
2.2.1. Início do uso da energia eólica .....	28
2.2.2. Tipos de turbinas eólicas .....	32
2.2.3. Legislação brasileira para o setor de energia eólica .....	38
2.3. AEROGERADORES .....	39
2.3.1. Partes do aerogerador .....	40
2.3.1.1. Rotor .....	40
2.3.1.2. Sistema de transmissão .....	41
2.3.1.3. Gerador elétrico .....	42

2.3.1.4.	Mecanismo de controle e orientação.....	42
2.3.1.5.	Torre .....	43
2.3.2.	Modelos comerciais de aerogeradores de pequeno porte .....	44
2.4.	<b>MATERIAIS COMPÓSITOS .....</b>	<b>46</b>
2.4.1.	Matrizes de materiais compósitos .....	49
2.4.2.	Reforços de materiais compósitos .....	50
2.4.3.	Processos de fabricação de materiais compósitos .....	52
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>56</b>
<b>4.</b>	<b>ANTEPROJETO E SIMULAÇÕES.....</b>	<b>58</b>
4.1.	DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DE PROJETO.....	59
4.1.1.	Forças contidas nos ventos .....	59
4.1.2.	Potência eólica.....	61
4.2.	DIMENSIONAMENTO E MODELAGEM .....	66
4.2.1.	Perfil aerodinâmico .....	67
4.2.2.	Modelagem geométrica em três dimensões.....	77
4.3.	SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	80
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>95</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>97</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

TEEH	Turbina Eólica de Eixo Horizontal
CAD	Computer Aided Design – Projeto/Desenho Assistido por Computador
3D	Tridimensional
MH110	Perfil aerodinâmico criado por Martin Hepperle
GWEC	Global Wind Energy Council (Conselho Global de Energia Eólica)
MW	Megawatt
GW	Gigawatt
kW	kilowatt
CAE	Computer Aided Engineering – Engenharia Auxiliada por Computador
CEEE	Companhia Estadual de Energia Elétrica
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
PIS	Programa de Integração Social
Cofins	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
ANP	Agência Nacional do Petróleo
a.C.	Antes de Cristo
NASA	National Aeronautics and Space Administration - Agencia Aeroespacial Norte Americana
IDER	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis
TEEV	Turbinas Eólicas de Eixo Vertical
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PIE	Produção Independente de Energia
SP	Serviço Público
APECOM	Autoprodução de Energia / Consumidor
APE	Autoprodução de Energia
rpm	Rotações por Minuto
W	Watt
EVR	Elementos de Volume Representativo

PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
MEKP	Metil-etil-cetona
GPa	Gigapascal
E	Energia Cinética
m	Massa
$v$	Velocidade do vento
$P_{dis}$	Potência disponível
$\rho$	Densidade do ar
A	Área varrida pelas pás de rotor eólico
$P_{ret}$	Potência retirada do vento
$v_1$	Velocidade do vento anterior às pás
$v_3$	Velocidade do vento posterior às pás
$v_2$	Velocidade do vento no nível das pás
$\lambda$	Velocidade específica ( $\lambda = \lambda_D$ )
$v_u$	Velocidade de rotação das pás
$\omega$	Velocidade angular
R	Raio
Cp	Coefficiente de potência
$\vartheta$	Ângulo de passo
$v_r$	Velocidade resultante
$\alpha$	Ângulo de ataque
$F_l$	Força de sustentação
$C_l$	Coefficiente de sustentação
$C_d$	Coefficiente de arrasto
L	Sustentação
D	Arrasto
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics - Comitê Nacional para Aconselhamentos sobre Aeronáutica
c	Corda da pá

$\pi$	PI (3,14159)
$n$	Número de pás
$r$	Raio local
$\beta$	Torção da pá (twist)
$\gamma$	Ângulo entre $v_r$ e $v_u$
arctan	Arco tangente = 1/tangente
NURBS	Non-Uniform Rational Bézier Spline – Superfície B-Spline não Uniforme e Racional
2D	Bidimensional
MEF	Método dos Elementos Finitos
$E_1$	Módulo de elasticidade na direção das fibras
$E_2$	Módulo de elasticidade na direção transversal as fibras
$\nu_{12}$	Coefficiente de Poisson
$G_{12}$	Módulo de cisalhamento no plano 1-2
$G_{13}$	Módulo de cisalhamento no plano 1-3
$G_{23}$	Módulo de cisalhamento no plano 2-3
$dr$	Componente que representa a espessura infinitesimal do anel considerado para o cálculo da área de varredura da pá
$dT$	Força de empuxo
$dU$	Força rotacional
N	Newton
$\sigma_{ij}$	Componentes do tensor de tensões
$X_t$	Resistência a tração na direção 1
$S_A$	Resistência ao cisalhamento nos planos 1-2 e 1-3
$X_c$	Resistência a compressão na direção 1
$Y_t$	Resistência a tração na direção 2
$S_t$	Resistência ao cisalhamento no plano 2-3
$Y_c$	Resistência a compressão na direção 2

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Ennio - fontes de energia .....	25
Figura 2 - Moinho de vento persa.....	29
Figura 3 - Moinho de vento inglês .....	30
Figura 4 – Pequena turbina eólica dinamarquesa .....	31
Figura 5 - Modelos de rotor com eixo vertical .....	32
Figura 6 - Rotor tipo Savonius .....	33
Figura 7 - Rotor tipo Darrieus .....	34
Figura 8 - Aerogerador de eixo horizontal instalados em Osório/RS.....	35
Figura 9 - Evolução do tamanho e potência de aerogeradores .....	36
Figura 10 – Maior fazenda eólica offshore do mundo, Inglaterra .....	37
Figura 11 - Simulação de uma turbina da empresa Magenn Power .....	37
Figura 12 - Turbina TEEV de levitação da empresa Maglev .....	38
Figura 13 – Possíveis usos de energia eólica.....	46
Figura 14 – Custo em função do desempenho para componentes compósitos .....	47
Figura 15 - Tipo de vento em função da altitude.....	60
Figura 16 - Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica.....	63
Figura 17 - Aproximação matemática do coeficiente de potência em função de $\lambda$ e do ângulo de passo .....	64
Figura 18 - Relação entre ângulos, força e velocidades em um perfil aerodinâmico.....	65
Figura 19 – Projeto gerador eólico de pequeno porte.....	66
Figura 20 - Sustentação (L) e arrasto (D) em função do coeficiente de potência e da velocidade específica $\lambda$ .....	69
Figura 21 – Forma do perfil aerodinâmico MH 110 .....	71
Figura 22 – Análise do perfil MH110 no JavaFoil.....	72
Figura 23- Dimensões da corda $c$ da pá para as seções definidas .....	75
Figura 24 – Suavização da pá.....	75
Figura 25- Ângulos de passo calculados para cada seção da pá.....	76
Figura 26- Primeiro e último ângulos de passo da pá.....	77

Figura 27- Modelo 2D da pá.....	78
Figura 28- Modelo com perfil aerodinâmico e <i>twist</i> .....	79
Figura 29- Pá com superfície.....	79
Figura 30 - Torção do perfil .....	80
Figura 31 – Diagrama para análise da pá .....	82
Figura 32 - Planos principais de uma lâmina de material compósito.....	84
Figura 33 – Pá modelada e com e condição de engaste na raiz.....	84
Figura 34 – Pá com atribuição das forças aerodinâmicas.....	86
Figura 35: Deslocamento na pá em m .....	89
Figura 36: tensões $\sigma_{11}$ (direção do eixo longitudinal da pá).....	89
Figura 37: Resultados do critério de falha de Hashin para tração na matriz.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade de energia instalada no mundo [MW].....	18
Tabela 2 – Usinas eólicas em operação no Brasil .....	19
Tabela 3 – Modelos comerciais de aerogeradores de pequeno porte .....	45
Tabela 4 – Composição de fibras de vidro tipo E, C e S em %.....	51
Tabela 5 – Propriedades dos tipos de fibra de vidro.....	51
Tabela 6 – Custo de fibras utilizadas em compósitos.....	52
Tabela 7 - Composição de uma placa típica em compósito de fibra de vidro.....	54
Tabela 8 – Altura de rugosidade em função do tipo de terreno.....	61
Tabela 9 – pontos de coordenadas do perfil MH110.....	70
Tabela 10 – Parâmetros em função do ângulo de ataque .....	73
Tabela 11 – especificações para modelagem da pá .....	78
Tabela 12 - Propriedades dos compósitos reforçados por fibras unidirecionais .....	83
Tabela 13 – Dados do teste de validação da malha .....	88
Tabela 14 - Dados obtidos nas simulações com diferentes espessuras para velocidade de vento 10m/s .....	92
Tabela 15 - Dados de deslocamento e forças atuantes na pá para diferentes velocidades de vento e espessura de 0,007m .....	93
Tabela 16 - Dados de falha de Hashin para espessura total 0,007m e diferentes velocidades de vento .....	93
Tabela 17 – dados de falha de Hashin para velocidade de vento 40m/s .....	94

## RESUMO

PIRES, Julio Cesar Pinheiro. **Estudo de Rotor para Turbina Eólica de Eixo Horizontal de Pequeno Porte com Aplicação de Modelagem e Simulação Virtual**. Porto Alegre, 2010. Dissertação (Mestrado em Design), Programa de Pós-Graduação em Design, UFRGS, 2010.

Este trabalho apresenta um estudo para aerogerador de pequeno porte projetado inicialmente para uso residencial. A ênfase está na modelagem e simulação virtual da estrutura das pás em compósito de fibra de vidro. A modelagem geométrica foi feita com *software* para desenho assistido por computador (CAD 3D). Para o projeto, foi escolhido o perfil MH110 que apresenta boa relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto e facilidade de fabricação. Os parâmetros como o diâmetro do rotor, a corda e a torção da pá, as relações entre velocidades e a aplicação de cargas na estrutura do material utilizado foram definidos segundo bibliografia específica, *software* para análise de perfil aerodinâmico e simulações pelo método dos elementos finitos. Procurou-se buscar sempre a maior eficiência, segurança e economia. O material considerado para o projeto das pás foi projetado para resistir às tensões decorrentes de operação em condições consideradas normais e para rajadas de vento. A simulação pelo método dos elementos finitos foi conduzida com ferramenta computacional e levou em conta os limites de falha do material utilizado. A geometria foi simulada sem reforço interno e apresentou baixo deslocamento quando submetida às cargas aerodinâmicas de empuxo e rotacional. Ao realizar simulação com critério de falha, foi possível determinar a espessura mais adequada para o material compósito e verificar seu comportamento de acordo com diferentes velocidades de vento.

Palavras-chave: Energia eólica, simulação computacional, método dos elementos finitos, modelagem geométrica.

## ABSTRACT

PIRES, Julio Cesar Pinheiro. **Study for Small Horizontal Axis Wind Turbine Rotor with application of modeling and virtual simulation.** Porto Alegre, 2010. Dissertação (Mestrado em Design), Programa de Pós-Graduação em Design, UFRGS, 2010.

This work presents a study for small wind generator designed for residential usage. The emphasis is modeling and virtual simulation of the blade structure made in composite material (fiberglass). Geometric modeling was performed by computer aided design (CAD 3D) software. The MH110 profile was chosen for design because it presents good ratio of lift coefficient and drag coefficient, and manufacturing facility. Parameters such as rotor diameter, chord and blade twist, the relationship between the blade speeds, and the application of loads on the material used were defined according to specific bibliography, software for airfoil analysis and simulations by finite element method. It tried to always seek most efficiency, safety and economy. The material was designed to withstand the stresses arising from operation under conditions considered normal and wind gusts. The simulation by finite element method was conducted by computational tool and took into account the material failure criterion. The geometry was simulated without internal reinforcement and presented low displacement when subjected to aerodynamic loads of thrust and rotational forces. When performing simulation with the failure criterion, it was possible to determine the most appropriate thickness for the composite material and verify its behavior under different wind speeds.

Keywords: Wind energy, computational simulation, finite elements method, geometric modeling.



## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica está presente em diversos setores da atividade humana. Os setores residencial, comercial, industrial, entre outros, são abastecidos com eletricidade provinda de usinas de geração de energia elétrica. A extração dessa energia é feita através de métodos conhecidos por renováveis e não renováveis. O petróleo e seus derivados, por exemplo, podem ser considerados fontes de energia não renovável. Já a energia solar e a eólica são consideradas renováveis, limpas e ecológicas.

O aproveitamento do sol, bem como a utilização do vento para conversão em energia, são práticas que tendem a minimizar a emissão de poluentes na atmosfera visto que não requerem processos de combustão.

O vento é uma massa de ar que adquire energia cinética através da diferença de pressão de uma região para outra. Pode-se dizer que o vento é proveniente da energia solar, pois essa diferença de pressão se dá pela diferença de temperatura da superfície terrestre ou aquática.

Para Acioli (1994), energia eólica é o aproveitamento da energia do vento, é a maneira de se extrair energia do vento através de cata-ventos.

A produção de energia elétrica através da força eólica inicia-se somente por volta do século XX (Tolmasquim, 2003). Com o crescimento da economia mundial, veio o aumento significativo do consumo de eletricidade. A alta no preço do petróleo, juntamente com novas idéias de produção de energia limpa, ecológica e renovável, impulsionaram a proliferação de empresas especialistas em energia eólica. Os dinamarqueses foram pioneiros nessa prática.

Atualmente, a produção de energia eólica é muito visada por tratar-se de uma fonte não poluente e, teoricamente, inesgotável e também pelo apelo ecológico que se faz necessário diante de pressões impostas por tratados ou acordos internacionais para redução de emissão de gases poluentes na atmosfera.

A tecnologia permitiu o desenvolvimento dos equipamentos e, juntamente com novas demandas, surgem cada vez mais projetos inovadores.

Segundo o GWEC – Global Wind Energy Council (Conselho Global de Energia Eólica), existe atualmente mais de 30.000 turbinas eólicas em operação no mundo, totalizando mais de 157 mil MW de capacidade instalada cumulativamente de 1996 a 2009.

A distribuição das chamadas fazendas eólicas pelo mundo está intimamente ligada à presença de vento nas respectivas regiões. É flagrante a taxa de crescimento do uso da energia eólica nos últimos anos. Em 2005, mais de 59 GW de potência eólica estavam instalados em mais de 50 países (Dalmaz, 2007). A Tabela 1 mostra a evolução da capacidade instalada de 2008 a 2009.

Tabela 1 – Capacidade de energia instalada no mundo [MW]

País	MW em 2008	MW em 2009
EUA	25.237	35.159
Alemanha	23.903	27.777
China	12.104	25.104
Espanha	16.689	19.149
Índia	9.655	10.926
Itália	3.736	4.850
França	3.404	4.492
Reino Unido	2.974	4.051
Portugal	2.862	3.535
Brasil	341	606
Demais países	19.645	22.250

Fonte: GWEC – Global Wind Energy Council

Nesse contexto, os Estados Unidos estão em vantagem em relação a todos os outros países.

No Brasil, segundo a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, existem diversas centrais eólicas em operação e mais algumas outorgadas para início da fase de construção. Dentre elas, as com maior capacidade são as instaladas em Osório, no Rio Grande do Sul, com potência outorgada de 150.000 kW (somando-se os 50.000 kW do Parque Eólico de Osório, os 50.000 kW do Parque Eólico Sangradouro e os 50.000 kW do Parque Eólico dos Índios; todos no município de Osório) e a RN-15 de Rio do Fogo, no Rio Grande do Norte. A Tabela 2 apresenta 17 usinas instaladas e em operação no Brasil em 2008, totalizando uma potência de 272.650 kW.

A geração em grande escala, ou na escala do Megawatt, tem evidenciado seus benefícios. Porém, para a chamada geração de energia doméstica, alguns entraves como a falta de interesse

em executar projetos específicos são suficientes para não haver uma produção em série, assim como uma grande distribuição de modelos residenciais de geradores eólicos. Existem empresas capacitadas para esta produção, mas a massificação do uso de energia eólica está longe de ser realidade.

Tabela 2 – Usinas eólicas em operação no Brasil

Usina	Potencia outorgada (kW)	Potencia fiscalizada (kW)	Destino da energia	Proprietário	Município
Eólica de Prainha	10.000	10.000	PIE (produção independente de energia)	Wobben	Aquiraz – CE
Eólica de Taíba	6.200	5.000	PIE	Wobben	São Gonçalo do Amarante – CE
Eólica-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho	1.000	1.000	SP (serviço público)	CEMIG	Gouveia – MG
Eólica-Elétrica de Palmas	2.500	2.500	PIE	Centrais Eólicas do Paraná Ltda.	Palmas – PR
Eólica de Fernando de Noronha	225	225	PIE	Centro Brasileiro de Energia Eólica	Fernando de Noronha – PE
Parque eólico de Beberibe	25.600	25.600	PIE	Usina Eólica Econergy Beberibe S.A.	Beberibe – CE
Mucuripe	2.400	2.400	PIE	Wobben	Fortaleza – CE
RN 15 – Rio do Fogo	49.300	49.300	PIE	Energias Renováveis do Brasil S.A.	Rio do Fogo – RN
Eólica de Bom Jardim	600	600	PIE	Parque Eólico de Santa Catarina Ltda.	Bom Jardim da Serra – SC
Eólica de Olinda	225	225	PIE	Centro Brasileiro de Energia Eólica	Olinda – PE
Parque Eólico do Horizonte	4.800	4.800	APECOM (autoprodução energia/consuidor)	Central Nacional de Energia Eólica Ltda.	Água Doce – SC
Macau	1.800	1.800	APE (autoprodução de energia)	Petróleo Brasileiro S/A	Macau – RN
Eólica Água doce	9.000	9.000	PIE	Central Nacional de Energia Eólica Ltda.	Água Doce – SC
Parque Eólico de Osório	50.000	50.000	PIE	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	50.000	PIE	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50.000	50.000	PIE	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Millennium	10.200	10.200	PIE	SPE Millennium Central Geradora Eólica S/A	Mataraca - PB
Total: 17 Usinas			Potência Total: 272.650 kW		

Fonte: ANEEL (2008)

## 1.2. PROBLEMA

A geração de energia eólica é uma realidade viável e em expansão em todo o mundo. Diante de ferramentas computacionais com expressivo apelo visual, assim como uma ampla gama de possibilidades projetuais como modelagem tridimensional, apresentação de modelos em realidade virtual e possibilidade de se fazer simulações estruturais complexas com precisão, o problema de pesquisa aqui apresentado pode ser entendido da seguinte forma: Como desenvolver o projeto de um rotor de aerogerador de pequeno porte para uso doméstico com viabilidade técnica e econômica empregando conhecimentos em design virtual?

## 1.3. HIPÓTESE

Com o auxílio de ferramentas computacionais de apoio ao design é possível projetar um rotor de aerogerador de pequeno porte para ser fabricado com economia e operar com segurança.

## 1.4. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral do trabalho é realizar o anteprojeto de um pequeno aerogerador através de ferramentas computacionais, utilizando modelagem geométrica e simulações numéricas para os modelos das pás e evidenciando a importância da conversão de energia elétrica através de meios que minimizam a emissão de poluentes no meio ambiente (no caso, a energia eólica).

Os objetivos específicos desta pesquisa referem-se a:

- a. Realizar experimentos em desenho de rotores. Analisar quanto à aerodinâmica aplicada a hélices e estruturas de aerofólio. Desenhar as pás para ficar próximo ao coeficiente de potência<sup>1</sup> máximo;
- b. Analisar a viabilidade de uso de alguns materiais, para fabricação do rotor, quanto aos aspectos de custo, facilidade de execução, resistência, peso específico, deformações máximas, etc;

---

<sup>1</sup> Segundo Fink, coeficiente de potência é definido como a fração da potência do vento convertida em potência mecânica no eixo do rotor.

- c. Fazer simulações para determinar os limites estruturais do material escolhido para as pás, escolher um critério de falha e dimensionar o modelo otimizado utilizando *softwares* CAD para modelagem geométrica e CAE para simulações estruturais.

Como objetivo específico destaca-se também o fornecimento de materiais para consulta em bibliografia nacional e internacional através de publicações em periódicos e participação em congressos sobre o tema abordado, tais como:

- Apresentação oral de artigo no ENSUS - Encontro de Sustentabilidade em Projetos da Universidade do Vale do Itajaí, Santa Catarina, com o título: Gerador eólico de baixo custo para uso residencial, em abril de 2009. Na ocasião esse mesmo artigo foi selecionado para ser publicado na Revista Científica do Design, publicada em Santa Catarina.
- Apresentação de pôster no *20th COBEM – International Congress of Mechanical Engineering*, que é um evento internacional e ocorreu em Gramado/RS, em novembro de 2009. Título do trabalho: *Study of a Small Eolic Generator for Residential Usage*.
- Apresentação oral de artigo no 1st TMS-ABM - *International Materials Congress*, que aconteceu no Rio de Janeiro em julho de 2010. Título do trabalho: *Study of application of composite materials for horizontal axis wind turbine blades*.
- Artigo publicado nos anais do ENMEC2010 – Encontro Nacional de Materiais e Estruturas Compósitas, ocorrido na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cidade do Porto, Portugal, em setembro de 2010. Título do trabalho: Estudo de pá em fibra de vidro para turbina eólica de pequeno porte com aplicação de modelagem 3D e simulação virtual.
- Apresentação oral de artigo no *XXXI Iberian-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering*, que ocorreu em Buenos Aires, Argentina, em novembro de 2010. Título do trabalho: Modelagem em Três Dimensões (3D) e Simulação Computacional com Análise de Falhas para Turbina Eólica de Pequeno Porte Feita em Material Compósito.
- Artigo aceito para participação no ICCS 16 – *16th International Conference on Composites Structures*, que ocorrerá em junho de 2011 na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, cidade do Porto, Portugal. Título do trabalho: *Failure Analysis of a Horizontal Axis Wind Turbine Blade Made of Composite Material*.

## 1.5. JUSTIFICATIVA

Ao analisar a diversidade de atividades realizadas pelo homem, nota-se que o uso da energia se faz presente em quase sua totalidade. Métodos para extração e conversão de energia foram criados ao longo da história. Alguns fatores, como a produção em série e a necessidade de alimentar (com eletricidade) novas máquinas, por exemplo, contribuíram para um considerável crescimento no consumo da energia elétrica.

Com as fontes tradicionais de energia tendendo ao esgotamento e com a crescente agressão ao meio ambiente por parte da queima de combustíveis fósseis, ganharam maior expressão as fontes alternativas de geração de energia. Entre elas, a energia eólica.

A geração de eletricidade para diversos usos pela captação e conversão da energia mecânica do vento requer conhecimento de uma série de princípios científicos.

Um entendimento mais aprofundado sobre energia eólica e a qualificação de projetos desenvolvidos com tecnologia computacional apresentam-se como fatores essenciais para otimização de estruturas e partes das máquinas aerogeradoras. O desenho das pás de um rotor, por exemplo, pode ser potencializado à medida que forem exploradas ferramentas adequadas para modelagem 3D e simulações feitas por computador.

Os ensaios feitos com tecnologia computacional (simulação virtual) permitem uma aproximação das situações reais, principalmente do estado de tensões das estruturas que compõem o objeto estudado, possibilitando seleção de materiais adequados e dimensionamento com economia e segurança.

Ao passo que se desenvolvem pesquisas para aerogeradores de uso residencial, aumenta a probabilidade de estes aparelhos constituírem alternativas viáveis financeiramente ao fornecimento de energia feito por concessionárias tradicionais, pois um fato que justifica o não investimento em desenvolvimento de aerogeradores de pequeno porte é o preço final que se paga pela eletricidade.

Segundo a Companhia Estadual de Energia Elétrica – CEEE, que é uma concessionária de serviços de distribuição de energia elétrica na região sul-sudeste do Rio Grande do Sul, em seu Simulador de Consumo, é possível calcular e verificar que atualmente 1 kWh custa para consumidor final residencial, na ordem de R\$ 0,37 (já incluído ICMS de 25% e alíquota PIS/Cofins média de 5%). A média mensal de uma residência considerada comum fica na ordem de 280 kWh, portanto com uma conta mensal de aproximadamente R\$ 103,60. Esse valor ainda

pode ser considerado baixo se comparado ao custo de investimento em um equipamento de conversão eólica.

O anteprojeto descrito neste trabalho leva em conta o baixo custo de fabricação, o alto desempenho e a simplicidade. Segundo Jureczko *et al* (2005), o custo de fabricação das pás de uma turbina eólica está na ordem de 15 a 20% do custo total de produção da turbina.

## 1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este é um trabalho de pesquisa acadêmica em Design e Tecnologia cujo tema abordado aproxima-se da área de engenharia.

Apesar de contar com algumas atividades desenvolvidas normalmente por engenheiros, esta pesquisa está inserida na área das ciências sociais aplicadas, abordando principalmente a caracterização e o desenvolvimento de produto. Por esse motivo, busca-se tratar o tema com amplitude, sem um maior aprofundamento em uma única área. Sendo assim, esta dissertação foi estruturada da seguinte maneira:

No capítulo 1 destaca-se a introdução ao tema com uma contextualização e posterior apresentação do problema de pesquisa, a hipótese, objetivos geral e específicos e as justificativas e do trabalho.

No capítulo 2 encontra-se a fundamentação teórica feita através de uma pesquisa exploratória, onde é apresentado um histórico sobre transformação de energia, as fontes de energia, o início do uso da energia eólica, desenvolvimento de aerogeradores e materiais utilizados na fabricação de pás para aerogeradores.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia utilizada para atingir-se os objetivos da pesquisa.

No capítulo 4 destaca-se o anteprojeto e as simulações computacionais realizadas a partir de uma peça modelada virtualmente. São apresentados resultados das simulações em tabelas e figuras.

No capítulo 5 estão as considerações finais e indicação para futuros trabalhos.

No capítulo 6 encontram-se as referências bibliográficas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. HISTÓRICO SOBRE TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA

Desde o início das civilizações o homem vem extraindo da natureza formas de energia para seu benefício. No âmbito da biologia, pode-se dizer que a necessidade mais básica dos seres vivos é a busca de energia para manter seus corpos em funcionamento. Segundo Rosim (2008), a energia é fundamental para o desenvolvimento de uma nação bem como para a manutenção da vida.

O desenvolvimento humano propiciou a troca do simples atendimento de suas necessidades fisiológicas de subsistência, para utilização de fontes primárias de energia. Primeiramente com a descoberta e o domínio do fogo, que representou um marco do domínio do homem sobre as forças naturais. Logo após, com a domesticação de animais foi possível desenvolver meios de transporte e novas formas de conduzir lavouras.

O aumento da população mundial, juntamente com o desenvolvimento do sistema capitalista do século XVIII culminou na Revolução Industrial. Nesse contexto, a energia, como a conhecemos, assumiu um papel fundamental na substituição do trabalho humano e animal pelo das máquinas.

O processo de crescimento expandiu-se. A descoberta da eletricidade e a invenção de novas máquinas elétricas acabaram trazendo em suas esteiras o início da produção em massa de automóveis, outros meios de transporte e uma infinidade de outros aparelhos. Esses fatores contribuíram para uma sociedade de consumo caracterizada por intensidade energética extrema.

Os combustíveis fósseis (derivados do petróleo e do carvão mineral), bem como os extraídos da biomassa ou ainda os nucleares, são utilizados tanto para mover sistemas e equipamentos como na geração de energia elétrica. A produção de eletricidade também é feita por usinas hidrelétricas, termelétricas, usinas eólicas, usinas geotérmicas entre outras.

O diagrama Ennio, representado na Figura 1, separa as fontes de energia em renováveis e não renováveis. Para Ignácio (2007) existem três fontes primárias de energia: a solar, a geotérmica e a gravitacional. Todas essas são consideradas fontes renováveis. Há ainda as chamadas fontes secundárias de energia renovável: energia dos oceanos, energia eólica, energia hidráulica e energia da biomassa. Ignácio (2007) ainda citando o diagrama Ennio, aponta as fontes não renováveis de energia primárias como energia nuclear; e fontes secundárias de energia



não renovável como os compostos de petróleo, o gás natural, o carvão mineral, a turfa e o xisto, todos os subprodutos da biomassa.

É desse tipo de energia que o homem está dependente. As diversas maneiras de produzir energia foram sucedendo-se no decorrer da história recente, algumas mais eficientes, outras contendo mais riscos de acidente. Dentre as formas que se destacam, está a combustão de biomassa.

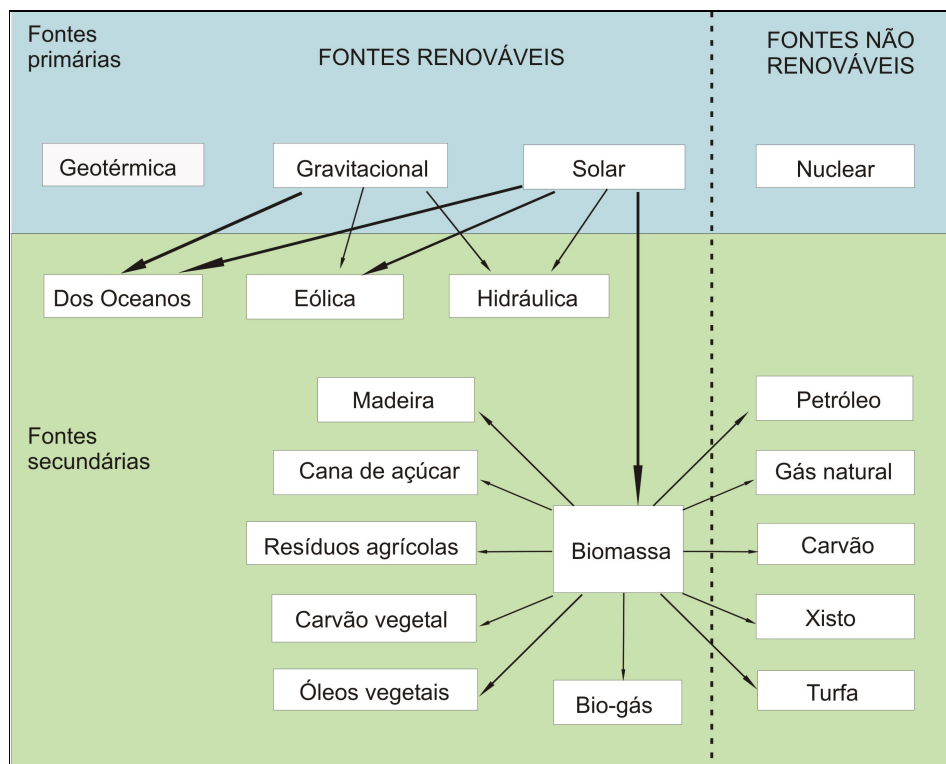


Figura 1 - Diagrama Ennio - fontes de energia

Fonte: [http://www.eca.usp.br/njr/voxsocientiae/ercio\\_ignacio\\_38.htm](http://www.eca.usp.br/njr/voxsocientiae/ercio_ignacio_38.htm), acessado em 27/03/2009

### 2.1.1. Energia da biomassa

Biomassa é um material de origem orgânica considerada uma fonte de energia. Os processos pelos quais se extrai essa energia são: combustão, gaseificação, produção de substâncias líquidas e fermentação.

Na combustão, a conversão de biomassa em eletricidade se dá pela queima de carvão vegetal e outros materiais vegetais. Nesse processo há geração de calor, na qual algumas usinas já

fazem aproveitamento. Alguns problemas provenientes dessa prática são bastante discutidos atualmente, pois o processo de combustão provoca a liberação de dióxido de carbono na atmosfera.

Chama-se de gaseificação de biomassa a conversão de matéria orgânica em combustível gasoso por um processo de degradação biológica de resíduos, como o próprio lixo urbano ou da agroindústria. Entre os produtos extraídos desse processo, estão o hidrogênio, o monóxido de carbono, o dióxido de carbono (biogás) e o metano. Esses gases também são extraídos para utilização na indústria química.

A produção de bio-óleos pelo processo de pirólise<sup>2</sup>, a conversão de açúcares da cana e da beterraba em etanol pela ação de bactérias, a extração de óleos da mamona e principalmente da soja são exemplos da utilização da biomassa como substâncias líquidas e subprodutos da fermentação. O álcool combustível e o biodiesel são fontes de energia provenientes da biomassa largamente utilizadas no Brasil. Segundo dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo), a produção brasileira de biodiesel esteve na ordem de 176 milhões de litros em 2008.

### 2.1.2. Energia de combustíveis fósseis

Os combustíveis fósseis são o resultado do longo processo de decomposição de plantas e animais através da pressão e altas temperaturas por milhões de anos.

O petróleo destaca-se na lista dos combustíveis fósseis mais utilizados pelo homem. Entretanto existem outros dois compostos de carbono que são utilizados para produção de energia: o gás natural e o carvão mineral.

Combustíveis fósseis estão entre os chamados não renováveis, pois apesar de geologicamente estarem sempre em formação pela natureza, sua extração é maior do que a capacidade que nosso planeta tem de gerar compostos para sua formação.

A produção de energia elétrica através de combustíveis fósseis é feita principalmente por usinas termelétricas. Essas usinas são altamente poluentes, enviando toneladas de gases poluentes para atmosfera, provocando o efeito estufa e muitas vezes até chuva ácida, contribuindo assim para o aquecimento global.

---

<sup>2</sup> Pirólise é um processo de queima de biomassa, geralmente madeira, até a ruptura da estrutura molecular do material, geralmente na ausência de ar. Com isso obtêm-se os subprodutos gases e ácidos próprios para produção de metanol, acetona e outros ácidos.

### 2.1.3. Energia nuclear

A energia nuclear é convertida pelo processo de fissão nuclear. Segundo Burattini (2008), nesse processo, é feita a divisão do núcleo do urânio (elemento químico da natureza) em dois núcleos menores. Essa divisão gera grande quantidade de calor. A energia térmica resultante do processo é conduzida para uma turbina que gera eletricidade.

A fissão nuclear tem algumas virtudes, entre elas a não emissão de gases na atmosfera como ocorre na queima de biomassa ou combustíveis fósseis. No entanto, a fissão nuclear pode dar origem a uma reação em cadeia de quebra de núcleos atômicos, originando uma quantidade extremamente grande de energia. Esse é o princípio da bomba atômica (Burattini, 2008).

### 2.1.4. Energia de fontes alternativas

As fontes alternativas de energia podem ser consideradas como soluções para possíveis crises de escassez de combustíveis convencionais.

Entre as consideradas alternativas estão: a energia solar, a energia eólica, a maré-motriz, a geotérmica e as células de hidrogênio como combustível.

A energia solar pode ser dividida em fotovoltaica e termo solar. A energia fotovoltaica é extraída pela conversão direta da luz solar em energia elétrica. Em 1839 o físico francês Edmond Becquerel descobriu que a absorção da luz solar produz uma diferença potencial nos extremos de uma estrutura de material semicondutor. Essa estrutura é chamada célula fotovoltaica.

A energia termo solar funciona com a coleta do sol através de painéis solares. Apesar dessa forma de captar energia ser largamente utilizada para aquecimento de água para utilização direta em residências, existem usinas solares que utilizam conjuntos de espelhos para refletir a luz solar, convergindo-a a um reservatório de água que será aquecida dessa forma. Esse aquecimento gera vapor e move uma turbina de conversão elétrica.

Energia eólica é aquela captada por aparelhos chamados aerogeradores, que transformam a energia cinética dos ventos em eletricidade. Esse tipo de geração de energia será tratado com mais profundidade no decorrer desta pesquisa.

A maré motriz consiste na geração de energia através de duas maneiras: o movimento do fluxo das marés, utilizado para mover comportas no sentido vertical, gerando uma energia

potencial pela diferença de altura; e a energia cinética gerada pelas correntes devida também às marés. Em ambos os casos, a energia é direcionada para turbinas que geram eletricidade. A maré motriz constitui uma excelente fonte “inesgotável” de energia, contudo seu custo de implantação é bastante elevado, o que ainda inviabiliza sua utilização em larga escala.

A energia geotérmica também constitui uma fonte abundante a ser explorada. Nosso planeta é constituído por camadas. Nas camadas abaixo da superfície terrestre existe um manto formado por rocha em estado líquido, chamado de magma. Próximo a essas zonas existem depósitos de vapor d’água com temperaturas bastante elevadas. Para geração de eletricidade são constituídas usinas onde haja jazidas geotérmicas. Essas usinas geralmente extraem o vapor proveniente das camadas inferiores à crosta terrestre e fazem a conversão em eletricidade através de turbinas específicas (Burattini, 2008).

As células de hidrogênio são utilizadas para armazenamento e transporte de energia. Para que o hidrogênio torne-se fonte de energia, ele precisa ser isolado. Para isso é necessário mais energia do que ele é capaz de proporcionar, portanto este se constitui em uma fonte não sustentável.

## 2.2. ENERGIA EÓLICA

### 2.2.1. Início do uso da energia eólica

Existem controvérsias no que tange a data de início da utilização da força do vento pelo homem. Segundo Marschoff (1992), em torno de 3000 a.C. os egípcios iniciaram o uso do vento como forma de energia para ajudar os escravos na propulsão de seus barcos. Já para Tolmasquim (2003), pelo menos há 5000 anos eram feitas navegações pelo Rio Nilo, no Egito, utilizando velas.

Na idade antiga, os persas construía moinhos de vento de eixo verticais utilizados para moagem de grãos. Outros moinhos foram desenvolvidos na Holanda e Inglaterra. Na Idade Média as lâminas e engrenagens tiveram projetos mais avançados, melhorando muito sua tecnologia (Marschoff, 1992).

O moinho de vento persa, mostrado na Figura 2, era bastante rudimentar pela pouca experiência daquela civilização na prática do uso do vento. Por certo, foi um dos primeiros povos

a construir cata-ventos acoplados em edificações. Essas estruturas serviam principalmente para mover mecanismos com função de moagem de grãos ou elevação de água.



Figura 2 - Moinho de vento persa

Fonte: <http://www.ullesthorpewindmill.org.uk/images/uploads/gulfVillage.jpg>

Na Europa, segundo Steadman (1978), até o século XII não se conheciam moinhos de vento. Entretanto, com a introdução desses dispositivos através das pessoas que combatiam nas cruzadas, primeiramente na Inglaterra, os europeus se distinguiram por fazer adaptações e alterações variando de região para região, de acordo com características geográficas e culturais. Dessa forma, certa evolução pode ter culminado no projeto de moinhos de eixo horizontal, como apresentado na Figura 3.

A revolução industrial acelerou o processo de substituição das formas de energia do século XIX. O crescimento das cidades levou ao despovoamento das zonas rurais. A criação de grandes fábricas que se utilizavam da energia a vapor e da novíssima energia elétrica, bem como o advento do motor a combustão interna foram alguns dos fatores que contribuíram para o declínio da atividade dos moinhos de vento.



Figura 3 - Moinho de vento inglês

Fonte: [http://farm3.static.flickr.com/2315/2251355154\\_ae91d7da53.jpg?v=0](http://farm3.static.flickr.com/2315/2251355154_ae91d7da53.jpg?v=0)

Atualmente as edificações onde antes funcionavam antigos moinhos passam por processos de restauração para fins de preservação de patrimônio. A principal atividade é exploração turística.

Alguns fatores contribuíram para o desenvolvimento da turbina de geração de eletricidade. Para Carvalho (2003), o professor e cientista Poul La Cour (1846 – 1908) foi um dos pioneiros para construção de modernas turbinas eólicas. Em sua época, Poul La Cour construiu um túnel de vento para realização de experimentos e já considerava um dos problemas envolvendo energia eólica: o armazenamento de energia.

Em 1956 o engenheiro Johannes Juul construiu, para a empresa Seas, na Dinamarca, uma turbina com três pás, gerador assíncrono e freios aerodinâmicos nas pontas das pás. Esta turbina foi por diversos anos a maior do mundo, tendo posteriormente aos onze anos de vida útil sem manutenção, seu recondicionamento em 1975 a pedido da NASA (Agencia Aeroespacial Norte Americana), para estudos de medições objetivando o novo programa de energia eólica dos Estados Unidos. (Appio, 2001).

Após a fase de declínio dos antigos moinhos, a década de 1970 trouxe consigo uma grande crise mundial de petróleo. Este fato despertou novamente interesse por parte de países europeus e dos Estados Unidos na busca de novas fontes de energia independentes do petróleo e do carvão. É dessa forma que nasce, ou renasce a indústria de equipamentos específicos para conversão de energia eólica em energia elétrica.

Por volta da década de 1970, os dinamarqueses investiram em projetos de aerogeradores de pequeno porte para geração de energia elétrica. Algumas pequenas e médias empresas que fabricavam maquinário agrícola naquele país, começaram a desenvolver pequenos rotores eólicos. Estes equipamentos tinham venda assegurada para fazendeiros ou proprietários particulares (Hau, 2006).

Segundo Hau (2006), os aerogeradores de pequeno porte dinamarqueses (figura 4) representavam uma pequena parcela no que tange conversão de energia, entretanto alguns fazendeiros iniciaram um movimento com objetivo de formar cooperativas. Dessa forma foi possível, entre outros benefícios, adquirir equipamentos com preço menor, construir plantas maiores, operadas em instalações comunitárias e, ainda, obtiveram regulamentação legal por parte do governo.



Figura 4 – Pequena turbina eólica dinamarquesa  
Fonte: Hau (2006)

Segundo o IDER, Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Energias Renováveis, a primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada na Dinamarca, em 1976.

O pioneirismo dos dinamarqueses pode representar um bom exemplo de como iniciar um movimento para ampliar a atividade de conversão energética em pequena escala.

### 2.2.2. Tipos de turbinas eólicas

Os modelos mais comuns encontrados na literatura são as TEEV (Turbinas Eólicas de Eixo Vertical) Darrieus, Savonius e Molinete (Figura 5) e os aerogeradores de eixo horizontal TEEH (Turbina Eólica de Eixo Horizontal) com grande diversidade de desenhos.

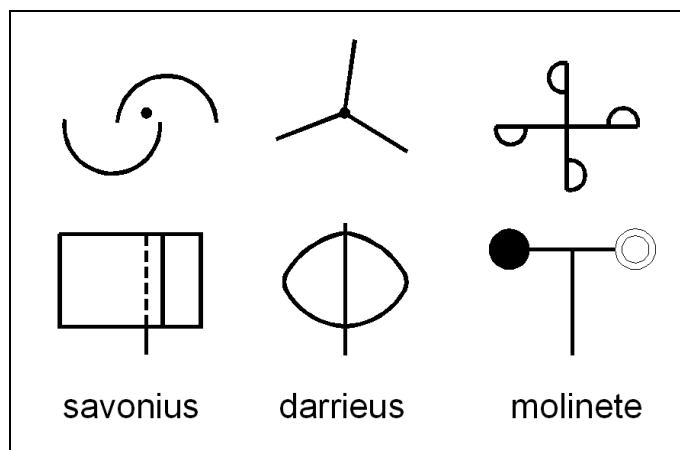


Figura 5 - Modelos de rotor com eixo vertical

Fonte: adaptado de painel de apresentação de Mafalda Antunes, Departamento de Eletrônica Industrial – Universidade do Minho, Portugal

Segundo Acioli (1994), os rotores de eixo vertical possuem grande torque e baixa rotação, sendo ideais para trabalhos pesados como puxar água ou moer grãos. Para Alé *et al.* (2006), as vantagens dos modelos TEEV estão associadas a não necessidade de sistemas de controle para o direcionamento da turbina em relação ao escoamento principal, bem como os aspectos de construção e manutenção, já que os geradores estão ao nível do solo.

O modelo Savonius, inventado pelo engenheiro finlandês Sigurd J. Savonius em 1922 é uma TEEV constituída por duas pás em formato de conchas dispostas lado a lado, em posições



contrárias e ligadas a um eixo vertical (Figura 6). Essas turbinas são movidas predominantemente por forças de arrasto.

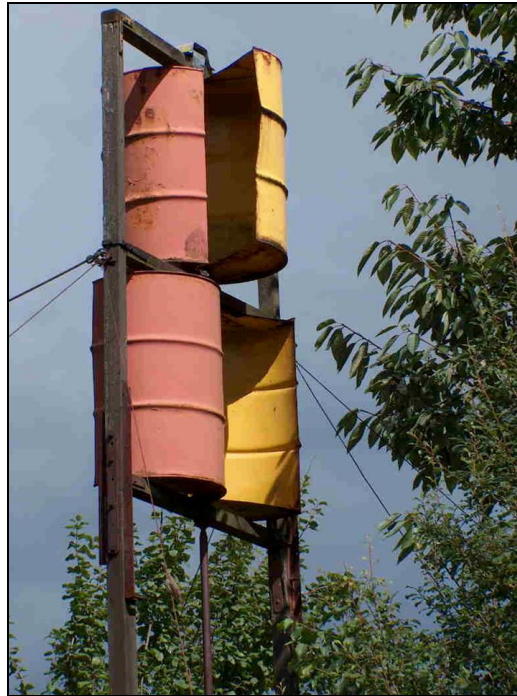


Figura 6 - Rotor tipo Savonius

Fonte: <http://www.energia0co2.com/Portals/0/images/HPIM3343.jpg>

A turbina Darrieus, desenvolvida em 1931 pelo Francês G. J. M. Darrieus é um modelo que apresenta duas ou três pás em formato de Catenária<sup>3</sup> mostrado na Figura 7. Segundo Alé *et al* (2006), essas máquinas apresentam deficiências de arranque, sendo necessários motores para dar partida.

Uma vez que a eletricidade em geradores eólicos é obtida por um alternador que transforma movimento de rotação em energia elétrica, os equipamentos com maior velocidade de rotação são os mais indicados para conversão de energia, pois converterão mais energia em menos tempo em relação a equipamentos com baixa rotação.

---

<sup>3</sup> Em matemática a catenária descreve uma curva plana semelhante às que seriam geradas por uma corda suspensa pelas suas extremidades e sujeita a ação da gravidade.



Figura 7 - Rotor tipo Darrieus

Fonte: <http://www.molenvanbuursink.nl/fotos/tonmolen/darrieus+savonius.jpg>

As turbinas de eixo horizontal de médio e grande porte apresentam vantagens em relação às TEEV. Uma dessas vantagens é a velocidade de rotação mais elevada. Estes modelos são, atualmente, os mais usados na geração de energia elétrica conectada a redes de transmissão.

Segundo Appio (2001) um gerador eólico TEEH é formado por três partes principais: rotor, gerador e torre. Cada um desses itens tem inúmeras peças de montagem e a isso é aplicada tecnologia suficiente para junção dos componentes e funcionamento adequado do sistema, como em qualquer máquina.

O rotor é composto pelas pás, eixo e engrenagens para transmissão do movimento de rotação para o gerador. As pás de um rotor de eixo horizontal são objetos de estudos de aerodinâmica para a otimização de seu emprego em aerogeradores. Em números de uma, duas, três, quatro ou diversas, as pás são elementos aerodinâmicos projetados para produzir forças de sustentação elevadas e pequenas forças de arrasto (Appio, 2001).

Os modelos mais utilizados na atualidade são os TEEH de três pás (Figura 8), geralmente fabricadas em fibra de vidro. Contam ainda com sistemas de freios aerodinâmico, mecânico ou eletrônico, acionado quando o vento torna-se demasiadamente forte.



Figura 8 - Aerogerador de eixo horizontal instalados em Osório/RS  
Fonte: fotografia de arquivo do autor

A área abrangida pelo movimento circular das pás é um dos parâmetros que define o quanto de energia o gerador irá proporcionar, conforme apresenta a Figura 9. Portanto a energia está ligada diretamente ao comprimento (seção longitudinal) da pá.

Um sistema de engrenagens de tamanhos distintos pode ser empregado para aumentar o giro e transferir movimento rotatório ao gerador, que funciona como um dínamo ou alternador (Appio, 2001). Alguns aerogeradores contam com tecnologia suficiente para descartar o uso de engrenagens, reduzindo o número de peças nos componentes.

Os geradores, ou equipamentos de conversão eletro-mecânica, entram no sistema com duas possíveis finalidades definidas: fornecer energia para uma rede de eletrificação, geralmente como uma alternativa secundária à rede existente, ou carregar baterias para diversos usos.

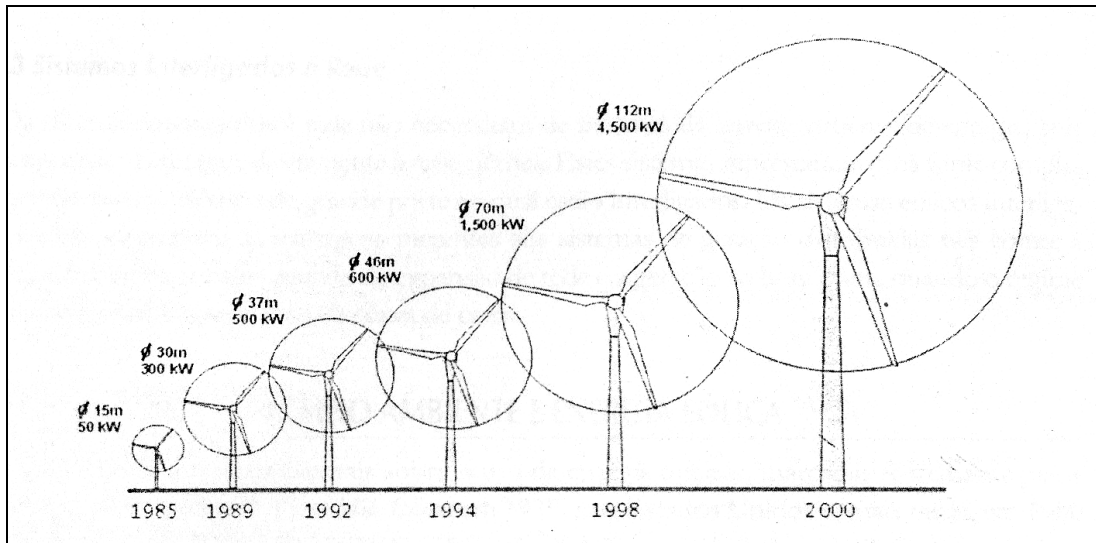


Figura 9 - Evolução do tamanho e potência de aerogeradores  
 Fonte: Kuik apud Tolmasquim (2003)

A altura do rotor está diretamente relacionada com as condições de vento do local. Normalmente quanto mais alto estiver, mais vento será possível alcançar. Esse fato eleva a preocupação com a estruturação do equipamento. A torre de sustentação deverá ser calculada não somente em função da carga exercida pelas peças suspensas, mas principalmente pela força do vento que terá de suportar (carga horizontal), e pela vibração causada pelo movimento das pás.

Atualmente, existem aerogeradores *offshore*, ou seja, fora da costa, mais precisamente localizados no mar, que representam grande evolução tecnológica. A busca por sítios adequados para instalação de centrais eólicas culminou por encontrar esse tipo de local. Centrais *offshore* encontram-se em um meio agressivo, pois o ar sobre a superfície marinha concentra diferentes elementos químicos em relação ao ambiente terrestre. Os materiais metálicos apresentam a maior preocupação para esse tipo de máquina. A corrosão de peças pode representar grande dificuldade na utilização, principalmente de materiais ferrosos de partes do gerador elétrico, entre outras peças do aerogerador. As partes constituídas de materiais poliméricos, que é o caso dos compósitos, podem ser projetadas para resistir a um meio químico agressivo. O avanço em pesquisas no campo dos materiais foi essencial para possibilitar a instalação de aerogeradores no mar. A figura 10 mostra instalação de um sistema eólico na costa sudeste da Inglaterra. Segundo a empresa Vattenfall, proprietária dos equipamentos, essa fazenda eólica conta com 100 turbinas

com capacidade total de produção de 300MW de energia (suficiente para abastecer 200 mil casas).



Figura 10 – Maior fazenda eólica offshore do mundo, Inglaterra  
Fonte: [www.vattenfall.co.uk](http://www.vattenfall.co.uk)

Quanto ao desenho ou design de aerogeradores, existem ainda experimentos e protótipos que estão em fase de projeto ou desenvolvimento para a mesma função de gerar eletricidade. A seguir, a Figura 11 mostra um projeto de aerogerador desenvolvido pela empresa canadense Magenn Power. Segundo a empresa, a turbina é constituída de um balão preenchido com gás hélio (menos denso que o ar), possui eixo horizontal, está elevada e suspensa por cabos a uma altitude de cerca de 300 metros e tem capacidade de gerar até 10 KW para velocidades de vento entre 6 km/h e 100 km/h.



Figura 11 - Simulação de uma turbina da empresa Magenn Power  
Fonte: [http://blog.uncovering.org/archives/2007/12/uma\\_turbina\\_eol.html](http://blog.uncovering.org/archives/2007/12/uma_turbina_eol.html)

Outro modelo de turbina TEEV, desenvolvido pela empresa Maglev (a mesma dos trens de levitação magnética), é apresentado na figura 12. Segundo a Maglev a turbina utilizaria ímãs permanentes de neodímio<sup>4</sup>, não havendo contato através de rolamentos, reduzindo assim possibilidades de manutenções periódicas. A turbina pode gerar entre 400 e 5000 watts e pode funcionar com uma simples brisa de 1,5 metros por segundo até ventos fortes de cerca de 40 metros por segundo, o equivalente a 144 km/h.



Figura 12 - Turbina TEEV de levitação da empresa Maglev

Fonte: <http://www.ecolosfera.com/2007/11/28/una-nueva-generacion-eolica-la-super-turbina-maglev/>

### 2.2.3. Legislação brasileira para o setor de energia eólica

Apesar da pouca disseminação de produção de energia para consumo próprio no Brasil, a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica dispõe de legislação para estabelecimento dos requisitos necessários para obtenção de registro ou autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia.

A resolução ANEEL nº 112 de 18 de maio de 1999, em seu artigo 2º dispõe sobre a aplicação da referida lei, listando os seguintes casos em que terão sua aplicação obrigatória:

---

<sup>4</sup> Metal do grupo terras raras, reativo, encontrado na natureza em minérios. Usado em poderosos ímãs permanentes, geram ímãs mais baratos que os de samário-cobalto. São largamente utilizados em discos rígidos de computador, acionadores de partida de motores entre outros produtos.

I – pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada à comercialização sob forma de produção independente;

II – pessoa física, pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio interessadas em produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo;

III – registro de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia, de potência até 5.000kW, destinadas à execução de serviço público; e

IV – ampliação e repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia destinadas à execução de serviço público.

O parágrafo 3º da resolução descrita acima aponta que centrais geradoras eólicas, termelétricas, entre outras, com capacidade igual ou inferior a 5.000kW, devem obter registro de implantação junto a ANEEL.

Esta resolução entrou em vigor em maio de 1999. A partir daí qualquer empreendimento construído para geração de energia através de sistema eólico, abaixo de 5.000kW deve passar por uma aprovação para obter autorização ou registro da ANEEL antes de entrar em operação.

O item II descreve que, inclusive pessoa física, que utilizará energia eólica exclusivamente para si, deverá atender essa resolução. Entretanto não fica devidamente claro se pessoa física ou jurídica, ao adquirir e instalar na própria edificação um aerogerador de pequeno porte, é necessário proceder todos esses trâmites.

### 2.3. AEROGERADORES

“Aerogeradores são as máquinas utilizadas para capturar e converter a energia cinética dos ventos e são constituídos, basicamente, de uma turbina ou rotor eólico, de um gerador elétrico e de sistemas integrados ou auxiliares, como a caixa de multiplicação e sistemas de orientação. Tais máquinas tiveram sua origem nos antigos moinhos de vento, que convertiam a energia cinética dos ventos em energia mecânica. Em épocas mais recentes, essas máquinas passaram a ser utilizadas para produção de energia elétrica.”

(DALMAZ, 2007).

### 2.3.1. Partes do aerogerador

Segundo Tolmasquim (2003) um sistema eólico deve propiciar um maior rendimento final trabalhando em harmonia. Para tal funcionamento, a maioria dos geradores de médio e grande porte conta com um rotor, uma caixa multiplicadora, um gerador elétrico, mecanismos de controle e orientação e uma torre de sustentação. O rotor é responsável pela transformação da energia cinética do vento em energia mecânica de rotação de um eixo (Tolmasquim, 2003). Já a caixa multiplicadora ou transmissão é responsável por elevar a rotação e transmitir essa energia de rotação a um gerador. Geralmente essa transmissão tende a aumentar o giro, aumentando assim a potência do gerador, que converte a rotação em eletricidade. Os mecanismos de controle e orientação direcionam o rotor e fazem o controle da velocidade das pás. A sustentação de todos esses componentes é feita pela torre, que tem altura conveniente para cada região em função das condições de vento.

#### 2.3.1.1. Rotor

Os rotores dos aerogeradores tipo TEEH atuais são compostos, geralmente, por três pás. Para Dalmaz (2007) já se utilizou, ao longo da história, materiais como madeira, aço, alumínio e materiais compósitos na fabricação das pás de turbinas de eixo horizontal.

- Madeira: As pás fabricadas em madeira, geralmente com aplicação de alguma resina, possuem baixa densidade, têm facilidade de manuseio e baixo custo, entretanto há uma excessiva exposição ao tempo, logo esse material tende a apresentar fissuras e irregularidades, aumentando o atrito com o vento e reduzindo sua eficiência. A madeira revestida com epóxi pode ser indicada para rotores até de 10m de diâmetro.

- Aço: as principais virtudes do emprego do aço em pás encontram-se em duas propriedades mecânicas: tenacidade e resistência. Apesar de o aço ser suscetível à corrosão quando exposto às intempéries, existem tratamentos superficiais para materiais metálicos com resultados positivos. A principal desvantagem no uso desse material é sua densidade. O peso do aço aumenta consideravelmente sua carga de inércia, aumentando assim a carga de vento necessária para o arranque do sistema.



- Alumínio: esse material é mais leve do que o aço e tem boa resistência natural a corrosão, entretanto tem baixa resistência a fadiga. O uso contínuo do alumínio requer manutenções constantes para avaliação sobre os ciclos de uso. Sua vida útil pode ser reduzida em relação aos rotores de aço.
- Fibra de carbono: conforme Krauter (2005) esse é um material composto, com alta tecnologia aplicada, melhoram a rigidez da estrutura das pás, porém é utilizado mais experimentalmente. Seu alto custo pode inviabilizar projetos de equipamentos de pequeno porte.
- Fibra de vidro: são os materiais mais aplicados para as turbinas na atualidade. Tem vantagens em relação a preço, que são competitivos se relacionados com os da fibra de carbono, apresenta boa resistência mecânica, resistência a ataques químicos (corrosão), coeficiente de dilatação baixo, resistência a fadiga, facilidade no processo de fabricação, gerando uma boa liberdade formal para os diversos projetos, entre outras virtudes. Outro aspecto positivo é que essa fibra pode ser disposta de acordo com o sentido das tensões solicitadas nas pás, ou seja, as pás em materiais compostos possibilitam uma geometria aerodinâmica lisa, contínua e precisa (Krauter 2005).

#### 2.3.1.2. Sistema de transmissão

O sistema de transmissão é composto pelo sistema de engrenagens, eixos e demais partes que transferem torque ao gerador. A rotação de geradores síncronos comuns está entre 1200 e 1800 rpm. A rotação dos rotores de médio e grande porte está na faixa entre 15 a 220 rpm. Essa baixa rotação se explica pelo fato de a velocidade na ponta da pá sofrer restrições. Essa velocidade fica entre 50 e 110 m/s, Krauter (2005).

A baixa velocidade de rotação das TEEH justifica o uso de sistemas que multipliquem essa rotação para abastecer melhor o gerador. Entretanto existem equipamentos com dimensões de rotor reduzidas. Segundo Krauter (2005) rotores com 1,00m de diâmetro podem atingir rotação de até 2000 rpm. Esses aerogeradores têm características que demonstram vantagem para utilização do eixo do rotor diretamente como eixo do gerador, dispensando assim o uso de engrenagens de multiplicação.

Para turbinas grandes, existe também uma solução que passa pelo projeto dos geradores elétricos. Para Dalmaz (2007), os geradores com muitos pólos se tornam bastante grandes e

pesados. Porém já existe uma tecnologia para equilibrar o sistema. Os geradores multipólos ligados diretamente na rede, sem caixa multiplicadora já contam com um regulador de frequência, que permite uma redução no número de pólos, gerando assim diminuição em seu peso, dimensões e preço.

#### 2.3.1.3. Gerador elétrico

Existem dois tipos de geradores utilizados em aerogeradores: os síncronos e os assíncronos. Geradores síncronos são usados geralmente com um conversor de frequência, permitindo que se trabalhe com velocidade variável, fazendo o controle da potência. Esses geradores são instalados tanto em pequenas turbinas como nas de médio e grande porte. Geradores síncronos geralmente não são conectados diretamente na rede elétrica, pois esta tende a ter frequência constante. Máquinas síncronas tendem a ser utilizadas para carregar baterias.

De acordo com Dalmaz (2007), os rotores assíncronos não têm necessidade de conversores de frequência e aceitam rotores com velocidades variáveis. Assim as variações da velocidade do vento também podem ser convertidas em energia elétrica.

Os geradores assíncronos fazem parte dos equipamentos conectados à rede elétrica. Aerogeradores de grande porte, quando fazem parte de fazendas eólicas com intuito de gerar energia na faixa de MW, se utilizam de máquinas assíncronas.

Equipamentos eólicos de pequeno porte, com pretensões de uso residencial podem utilizar-se de alternadores pequenos, síncronos, que geram corrente alternada para carregar conjuntos de baterias e abastecer parcialmente residências onde estejam instalados. Essa corrente elétrica gerada tende a aumentar conforme a potência de rotação do eixo do gerador.

#### 2.3.1.4. Mecanismo de controle e orientação

Os sistemas de controle dos rotores funcionam como freios aerodinâmicos ou facilitadores para rotação com ventos fracos. Em turbinas de pequeno porte não são aconselháveis mecanismos de controle ativo por sua complexidade e custo de instalação. Para esse tipo de equipamento, é aconselhável o controle passivo, ou controle estol, que trabalha com pás fixas. O

sistema de controle passivo, ou estol, requer desenho minucioso das pás, perfil aerodinâmico específico e torção longitudinal da pá, pois depende desses fatores a potência a ser atingida. Normalmente as pás são executadas com ângulo de passo que provoca perdas aerodinâmicas e reduz velocidade quando em ventos fortes (freio aerodinâmico). Dessa forma torna-se mais difícil o arranque do sistema assim como boa rotação com ventos mais fracos.

O mecanismo de controle ativo, também conhecido como controle de passo, permite alterar a potência e as cargas de vento incidentes nas pás. Tais mecanismos consistem no domínio do ângulo de rotação das pás em relação ao seu eixo longitudinal. Controles eletrônicos mandam sinais para o sistema, que aciona pequenos motores hidráulicos para fazer a rotação. Dessa forma é possível ajustar o ângulo de passo da pá e, conseqüentemente, o ângulo de ataque para ventos leves (velocidade de partida ou de arranque), ventos com velocidade calculada para o melhor rendimento (potência nominal) e ventos elevados que poderão prejudicar o equipamento. O controle ativo pode funcionar também como freio aerodinâmico quando em posição que tende a aumentar o arrasto e diminuir a sustentação, que é a responsável pela rotação das pás. Esse tipo de controle permite grande eficiência na captação de energia eólica na faixa de velocidade entre a de partida e a nominal, onde as cargas de operação do aerogerador são parciais. Dalmaz (2007).

A orientação do rotor perpendicularmente ao fluxo de vento é uma necessidade constante para captação do mesmo. Existem em turbinas de grande porte anemômetros, medidores de direção do vento e mecanismos de orientação direcional. Todos esses dispositivos trabalham em conjunto e em tempo real, executando ajustes para o resultado mais eficiente.

Em pequenas turbinas, o sistema passivo de orientação é o mais utilizado pelo baixo custo em relação ao controle de passo.

#### 2.3.1.5. Torre

A torre de um aerogerador sustenta todo o equipamento, é suscetível a diversas solicitações estruturais e pode ser um determinante da potência de energia extraída.

Segundo Dalmaz (2007) um aerogerador com rotor de mais de 120 metros de diâmetro pode pesar até 100 toneladas. Já a nacelle, que é a caixa contendo gerador, sistema multiplicador, equipamentos de orientação entre outros, pode ter massa de quase 300 toneladas. Somando esses

pesos, a torre precisa suportar cargas de compressão da ordem de 400 toneladas, fora seu peso próprio.

Outro esforço para o qual as torres devem ser dimensionadas são as cargas horizontais de vento, pois aerogeradores por natureza estarão expostos a ventos durante toda sua vida útil.

Entretanto o maior problema de projeto em relação às torres é a determinação do módulo de frequência desse componente, pois vibrações causadas pela rotação das pás, ou carga cíclica, podem gerar efeito de ressonância aumentando a amplitude de carregamento. Essa amplitude pode ocasionar fadiga no material da torre, reduzindo sua vida útil e, em casos extremos, ocasionando colapso da estrutura.

Os materiais mais comuns encontrados em torres de turbinas eólicas são: treliças de aço, aço tubular ou concreto. As primeiras turbinas instaladas para gerar eletricidade no Brasil foram instaladas na ilha de Fernando de Noronha e utilizaram torres metálicas treliçadas; que eram baratas, porém ocupavam maior espaço na base e dificultavam o acesso à turbina. As torres tubulares de aço ou concreto são as que prevalecem nos equipamentos modernos. Geralmente são pintadas de branco em sua extensão prevalecendo, próximo a base, os tons de verde.

A altura da turbina eólica é um dos fatores determinantes para captação do vento desejado no projeto. Como o diâmetro dos rotores é cada vez maior para turbinas de grande porte, as torres tendem a ser cada vez mais elevadas. Existem condicionantes na montagem das torres que podem influenciar na viabilidade de sua construção. Um exemplo são os guindastes capazes de erguer tamanha estrutura e peso a mais de cem metros do chão.

### 2.3.2. Modelos comerciais de aerogeradores de pequeno porte

Atualmente existem inúmeras empresas que fabricam e comercializam aerogeradores de pequeno porte. A tabela 3 apresenta 7 modelos de aerogeradores de pequeno porte com potência entre 1000 e 1100W, comercializados em diversos países.

Aerogeradores de pequeno porte podem ser utilizados para prover diversos segmentos da atividade humana. No início essa utilização era principalmente em locais para moagem de grãos ou bombeamento de água. Com o desenvolvimento dessas máquinas, cresceu sua utilização.

A gama de usos de aerogeradores de pequeno porte passa por carregamento de baterias para diversos usos, eletrificação rural em conjunto com geradores a diesel e/ou outras fontes,

dessanilização de água marinha para potabilidade, ligação na rede elétrica de residências, abastecimento de veículos elétricos, entre outras possibilidades. A figura 13 ilustra algumas das possibilidades de utilização listadas acima.

Tabela 3 – Modelos comerciais de aerogeradores de pequeno porte

Nome - fabricante	Potência	Diâmetro	Notas	Material das pás	Site	Preço (R\$)
Enersud (Brasil) – Linha Gerar 246	1000W - 12m/s	Ø=2,46m	650 rpm a 12m/s (3 pás)	Fibra de vidro	www.enersud.com.br	5.990,00
Southest Windpower (Australia) – linha Whisper 200	1000W – 11,6m/s	Ø=2,70m	Peso: 40kg – Vento limite: 55m/s	Fibra de vidro	www.windpowereenergy.com.au	11.990,00
Aeolos Wind Turbine (Dinamarca) – linha Aeolos H1kW	1000W – 12m/s	Ø=3,20m	Pode ser conectado a rede em alguns países. Vida útil: 30 anos	Fibra de vidro	www.windturbinestar.com	Sob consulta por e-mail
Aero Craft (Alemanha) – linha AC 1002 H	1000W – 9m/s	Ø=2,40m	600 rpm – Peso 45kg	Fibra de vidro	www.aerocraft.de	Não informado
Exmork New Energy Company (China) – linha FD-1kW	1000W – 8m/s	Ø=2,80m	380 rpm – Tempo de vida útil: 15 anos	Fibra de vidro	www.exmork.com	Não informado
Kestrel Wind Turbines (South Africa) – linha e 300i	1000W – 11m/s	Ø=3,00m	600 rpm	Fibra de vidro	www.kestrelwind.com.za	Não informado
Zephyr Corporation (Japão) – linha Airdolphin GTO	1100W – 12,5m/s	Ø=1,80m	Pode ser conectada a rede.	Fibra de carbono	www.zephyreco.co.jp	10.523,70

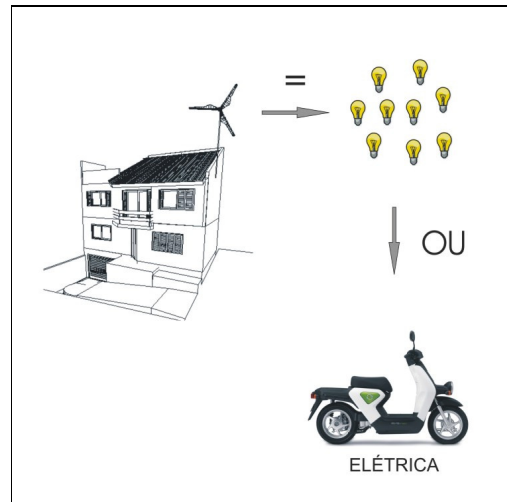


Figura 13 – Possíveis usos de energia eólica

No Brasil, em residências localizadas em centros urbanos, a utilização de aerogeradores de pequeno porte é quase inexistente. São escassos os pontos de venda desse tipo de equipamento. Salvo alguns *sites* da internet, onde é possível encontrar aerogeradores como produtos para venda, praticamente não se encontra esse produto em lojas ou outros tipos de comércio.

Grande quantidade de aerogeradores de pequeno porte comercializados no Brasil é fabricada fora do país. Atualmente há pouca demanda no mercado interno para esse tipo de aparelhos. Porém esse cenário de pouca demanda pode mudar, propiciando oportunidade e aumentando a participação de indústrias nacionais de aerogeradores.

## 2.4. MATERIAIS COMPÓSITOS

Os materiais que compõem o produto, seu dimensionamento, as interações entre esses materiais, constituem um item importante a ser estudado.

A seleção de materiais faz parte de uma das fases de desenvolvimento de projeto de produto. Alguns materiais têm características específicas como boa resistência mecânica ou a fadiga, ao passo que outros contam com preço mais baixo em função do baixo desempenho. A seleção dos materiais constituintes das pás do rotor poderá ser feita utilizando-se *software* adequado para essa atividade.

A eficiência do aerogerador é diretamente proporcional à eficiência do rotor, sendo as pás responsáveis diretas na interação com o vento. Por esses motivos, o material com que são feitas as pás têm influência na otimização de todo o sistema.

Materiais compósitos apresentam uma faixa de aplicação bastante elevada. Pode-se dizer que esse tipo de material é empregado, principalmente em função de seu custo, desempenho estrutural e cadência de produção (Neto e Pardini, 2006). Nas indústrias biomédica, aeroespacial e aeronáutica, por exemplo, o desempenho de componentes estruturais feitos em material compósito deve ser máximo, independente de custo. Já no caso da construção civil, não existe extrema necessidade de precisão em comparação com os segmentos citados acima, e muitas vezes o custo do material torna-se mais relevante que seu desempenho estrutural. A figura 14 apresenta uma escala de utilização de compósitos estruturais em função de custo e desempenho.

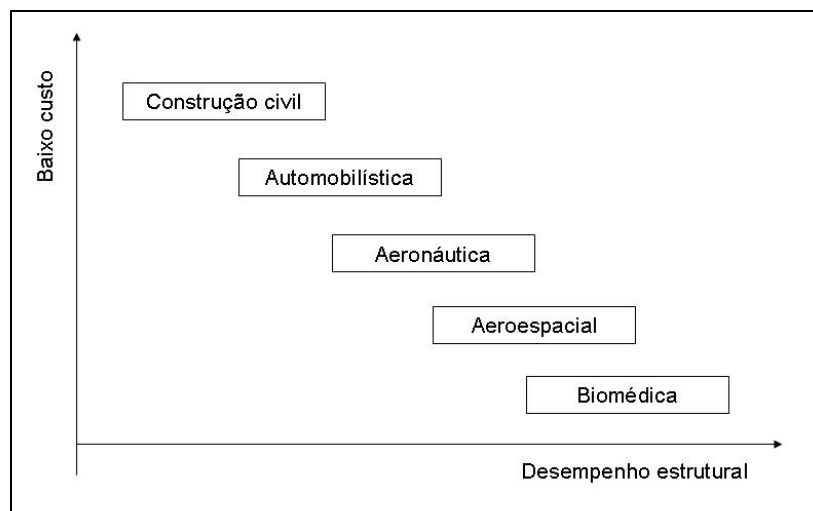


Figura 14 – Custo em função do desempenho para componentes compósitos  
Fonte: Neto e Pardini (2006)

Os materiais compósitos são materiais projetados para obter propriedades que não estão presentes nos materiais monofásicos. Segundo Oliveira (2003), os materiais podem ser definidos por suas propriedades mecânicas como:

- **Materiais homogêneos:** uniformes, apresentam propriedades constantes de um ponto a outro do material. Propriedades não são função da posição no corpo;

- **Materiais heterogêneos:** possuem fases distintas, apresentam propriedades que variam de um ponto a outro do material. Propriedades são função da posição no corpo;
- **Materiais isotrópicos:** propriedades em um ponto não são função da orientação. As propriedades são constantes para qualquer plano que passe por um ponto do material. Qualquer plano é um plano de simetria;
- **Materiais anisotrópicos:** as propriedades do material em um ponto são em função da orientação e não são constantes para qualquer plano que passe por um ponto do material. Não há planos de simetria;
- **Materiais ortotrópicos:** apresentam três planos perpendiculares de simetria.

Os materiais compósitos são anisotrópicos e apresentam propriedades que podem ser abordadas pela micromecânica e pela macromecânica. No estudo da macromecânica, o material é considerado homogêneo e o efeito de seus constituintes é visto como propriedade média em cada direção. Já para micromecânica são levadas em conta as propriedades dos materiais constituintes do compósito (fibra e matriz). Entretanto o estudo micromecânico dos compósitos se utiliza de uma “redução” para poder representar este material. Este é o conceito de EVR - Elementos de Volume Representativo, onde se destaca a menor região do material que contém todas as peculiaridades do material, representando assim todo o material compósito.

Os compósitos estruturais geralmente são utilizados como camadas para formar placas, cascas ou outros elementos onde prevaleçam sempre duas dimensões. Dessa forma é possível fabricar peças em compósitos, por exemplo, empregando diferentes camadas com diferentes direções para as fibras. Essas direções são definidas de acordo com alguns requisitos de projeto tais como: dimensões das peças (espessura principalmente), direção da solicitação de tração no material, direção da força cisalhante predominante no uso da peça.

O material mais utilizado para fabricação de pás para aerogeradores atualmente é o polímero reforçado com fibra de vidro, ou simplesmente fibra de vidro, onde sua produção procura aliar alto desempenho com reduzido custo no material e no processo de fabricação.

Os polímeros reforçados com fibras de vidro, ou simplesmente PRFV são materiais compósitos produzidos basicamente a partir da aglomeração de finíssimos filamentos flexíveis de vidro com resina poliéster, epóxi, ou outras. Posteriormente a essa mistura é aplicada uma



substância catalisadora de polimerização. Os PRFV têm alta resistência à tração, flexão e impacto, sendo muito empregados em peças estruturais. São leves e permitem ampla flexibilidade de projeto, possibilitando a moldagem de peças complexas, grandes ou pequenas, sem emendas e com grande valor funcional e estético.

As diferentes frações volumétricas conferem diferentes desempenhos nos produtos fabricados em PRFV (volume dos componentes:  $V_{\text{fibras}} - V_{\text{matriz}} - V_{\text{vazios}}$ ). Segundo Neto e Pardini (2006), o volume de vazio -  $V_{\text{vazios}}$  deve ser menor do que 1% para não prejudicar o desempenho mecânico do compósito.

#### 2.4.1. Matrizes de materiais compósitos

Matrizes formam a fase contínua do compósito e têm como função aglutinar reforços e distribuir ou transferir carregamentos ou tensões.

A seleção da matriz leva em conta as necessidades de projeto do compósito, tais como reciclabilidade, tenacidade a fratura entre outros.

As matrizes, ou resinas, podem ser polímeros à base de epóxi, poliéster, fenóis e etc. Existem dois grandes grupos de matrizes para PRFV: as termorrígidas e as termoplásticas.

As matrizes termorrígidas são as mais utilizadas. Essas resinas formam um líquido viscoso que se solidifica por reação química exotérmica de polimerização ou cura. A cura natural é lenta por conta da pouca mobilidade das moléculas de poliéster insaturado. Esse problema pode ser resolvido pela adição de catalisadores, onde radicais livres atacam as insaturações do poliéster, iniciando a polimerização em cadeia, formando uma rede termorrígida. O catalisador mais comumente utilizado é o metil-etil-cetona, ou simplesmente MEKP.

Existem quatro grupos de matrizes tipo termorrígidas:

- Hortoftálicas: uso em artesanatos, materiais simples;
- Tereftálicas: laminação em reforço de fibras;
- Isoftálicas: gel coat para exteriores, acabamentos;
- Bisfenólicas: peças em meio agressivo e elevada temperatura.

As resinas termoplásticas também servem como matrizes, porém são menos utilizados na fabricação de produtos de baixo custo. Esse tipo de material apresenta maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto, e tem possibilidade de ser reciclado. Esse fator pode ser um forte indicativo para seleção desse material em relação ao que não apresenta como característica a reciclabilidade.

As matrizes para produtos em PRFV podem ser compostas ainda por materiais cerâmicos, materiais carbonosos ou materiais metálicos. Todos esses com utilização em produtos com requisitos específicos.

#### 2.4.2. Reforços de materiais compósitos

Os materiais compósitos normalmente têm fibras como reforço. As fibras de vidro para materiais compósitos podem variar, determinando alguns aspectos importantes para seleção desse material.

Fibras de vidro tipo E (*electrical*), para reforço de compósitos, são largamente utilizadas por apresentarem baixo custo. Segundo Matthews e Rawlings (1999), o vidro tipo C (*chemical*) apresenta grande resistência a ácidos. O vidro tipo T (*thermal*) serve para isolamento térmico. O vidro tipo S (*strength*) confere alta rigidez aos reforços. O vidro tipo AR (*alkali resistant*) se caracteriza por possuir resistência em ambientes com alta alcalinidade.

O vidro tipo S, por exemplo, apresenta uma quantidade de óxido de alumínio que pode chegar quase ao dobro da encontrada no vidro tipo E; apresenta também cerca de três vezes mais óxido de magnésio do que esse mesmo vidro tipo E (tabela 4). Entretanto o custo do quilo do vidro tipo S chega a ser quase oito vezes maior em relação ao tipo E. (tabela 5).

O projeto de objetos fabricados com PRFV requer não só atenção para os custos dos componentes fibra e matriz como também para as propriedades que se pretende obter. Considerando que a resistência à tração do vidro tipo S chega a 2,80 GPa e a do vidro tipo E chega a 2,40 GPa, pode-se concluir que a diferença no valor é demasiadamente alta em relação à diferença do desempenho estrutural. Essa relação evidencia mais um fator determinante para seleção do tipo de fibra de vidro a ser aplicado na fabricação de determinado produto.

A tabela 4 mostra a composição típica de fibras de vidro utilizadas na manufatura de materiais compósitos. A tabela 5 apresenta algumas propriedades das fibras tipo E e S.

Tabela 4 – Composição de fibras de vidro tipo E, C e S em %

Constituintes	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	-	10	-	-

Fonte: Neto e Pardini (2006)

Existem ainda outros tipos de fibra empregados para materiais compósitos: as fibras de carbono, que apresentam baixo peso e alta resistência, porém alto custo em relação às de vidro; as fibras poliméricas; fibras cerâmicas de carbetto de silício ou alumina e as fibras naturais. A tabela 6 mostra as diferenças de preço entre reforços de fibra para materiais compósitos. A diferença entre fibras de vidro e fibras de carbono é bastante elevada.

Tabela 5 – Propriedades dos tipos de fibra de vidro

Tipos de fibras cerâmicas	Vidro E	Vidro S
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,55
Módulo de elasticidade (GPa)	70	86
Resistência à tração (GPa)	2,40	2,80
Módulo específico (Mm)	27	34
Preço (US\$/kg)	1,65 – 2,20	13,0 – 17,5
Preço (US\$/kg tecido)	10 - 20	20 - 40

Fonte: Neto e Pardini (2006)

Tabela 6 – Custo de fibras utilizadas em compósitos

Tipo de fibra	Preço/kg (US\$)	Preço/kg (US\$) tecido
<b>Vidro</b>		
Vidro A	1,40 – 2,00	10 - 80
Vidro C	1,65 – 2,20	
Vidro E	1,65 – 2,20	
Vidro S-2	13,0 – 17,5	100 - 200
<b>Carbono</b>		
Alto tex	20,0 – 26,5	150 - 300
Médio tex	33,0 – 44,0	
Baixo tex	88,0 – 154,0	
<b>Aramida</b>		
Aramida (Kevlar 29)	26,5 – 31,0	100 - 200
Aramida (Kevlar 49)	55,0 – 66,0	

Fonte: Neto e Pardini (2006)

#### 2.4.3. Processos de fabricação de materiais compósitos

Segundo Neto e Pardini (2006), os processos de fabricação de peças estruturais feitas em materiais compósitos correspondem de 50 a 60% do custo total do compósito. Os processos de fabricação diferem-se entre si por conta do tipo de transformação físico-química das matrizes durante a fase de moldagem. Alguns dos processos de fabricação são listados a seguir:

- **Moldagem manual:** basicamente empilha-se camadas de reforço, em forma de manta bidirecional ou tecidos com orientações predeterminadas. A resina é impregnada com auxílio, geralmente, de um pincel e é feita a cada camada de reforço sobreposta. Usa-se um agente químico endurecedor e a cura é feita

normalmente à temperatura ambiente ou em estufa. Este processo não apresenta adequado compromisso estrutural;

- **Moldagem por aspersão:** nesse processo, a resina é aspergida juntamente com o reforço em fibras curtas (fibra de vidro). O molde é envolvido com o material e a espessura é controlada pela quantidade de material aspergido. A cura é similar a do processo anterior;
- **Moldagem a vácuo:** a moldagem a vácuo apresenta uma melhoria em relação aos anteriores. As propriedades mecânicas são menos comprometidas por conta da retirada de voláteis e bolhas de ar. Com esse processo é possível obter frações volumétricas de vazios de menos de 5%;
- **Pré-impregnados:** processo bastante mais elaborado. Surge como uma exigência das indústrias aeronáutica e aeroespacial. Apesar de esse processo ter no custo um fator secundário, sendo a qualidade e o desempenho os requisitos principais, existe uma maneira de reduzir seu custo: modificar a composição da matéria prima utilizada sem comprometer o desempenho estrutural. A tabela 7 apresenta uma composição para placas feitas em material compósito onde aparece alta porcentagem de carbonato de cálcio, que é um aditivo mais barato do que reforço (fibra de vidro) e matriz (resina poliéster);
- **Moldagem em autoclave / hidroclove:** a autoclave de moldagem constitui-se numa estufa pressurizada onde se faz a cura de pré-impregnados. A hidroclove apresenta a mesma função, porém a cura se dá em um meio líquido.
- **Moldagem por compressão:** processo que deriva da estampagem de chapas metálicas e conformação mecânica de materiais metálicos. Consiste na aplicação de força mecânica no fechamento do molde, causando uma compressão. Após a prensagem, o conjunto é submetido a ciclos de aquecimento para cura.
- **Bobinagem contínua:** nesse processo os reforços de fibras contínuas são impregnados à medida que são bobinados em um mandril<sup>5</sup> rotatório. Utiliza-se bobinagem contínua na fabricação de tubos e vasos cilíndricos.

---

<sup>5</sup> Dispositivo acessório de máquina ou ferramenta, provido de garras reguláveis, para segurar a peça com que se vai trabalhar.

- **Pultrusão:** bastante semelhante à extrusão, esse processo permite fabricação de perfis com seção constante. Apresenta alto grau de automação.
- **Moldagem por transferência de resina:** nesse processo o reforço, com formato e orientação das fibras já definidos, é disposto em um molde, normalmente, do tipo macho e fêmea. A resina, com viscosidade controlada para atingir todos os espaços dentro do molde através das fibras de reforço, então é injetada lentamente por uma ou mais válvulas. Logo após o molde é aquecido para realização do processo de cura. Nesse processo obtém-se bom acabamento nas peças por utilizar-se moldes tipo macho e fêmea.
- **Moldagem por injeção:** a matriz termoplástica ou termorrígida passa por um equipamento com um pistão de injeção. O polímero então é injetado por um bico para dentro do molde aonde irá se solidificar e tomar a forma desse molde. O reforço pode entrar no processo de duas maneiras: pode ser a base de fibras curtas adicionadas ao polímero antes da injeção, ou é previamente acondicionado, em forma de placas, no molde e a matriz posteriormente é injetada.

Tabela 7 - Composição de uma placa típica em compósito de fibra de vidro

Componentes	% massa	Função
Estireno	13,4	Monômero reativo que permite pontes de ligações cruzadas
Resina poliéster	10,5	Monômero reativo que dá rigidez ao polímero após cura
Fibra de vidro	30,0	Reforço
Carbonato de cálcio	40,0	Carga – aumenta o volume do material e reduz custo da peça
Plastificante	3,40	Aditivo termoplástico – controla encolhimento
Iniciador	1,00	Fornece radicais livres para iniciação do processo de cura
Hidróxido de magnésio	0,70	Aumenta viscosidade e tixotropia
Estearato de zinco	1,00	Lubrificante / agente de desmoldagem

Fonte: Neto e Pardini (2006)

Para Ota (2004), os métodos mais utilizados para fabricação de compósitos termoplásticos são os métodos de moldagem a vácuo, termo-formação ou compressão, moldagem por extrusão ou pultrusão e moldagem por injeção.

### 3. METODOLOGIA

O presente trabalho constitui-se de uma pesquisa científica, sendo necessário o emprego de métodos científicos para sua realização.

A metodologia empregada para atingir os objetivos deste trabalho de pesquisa é apresentada da seguinte forma:

- a. Identificação e situação do tema no contexto histórico relativo às fontes de energia, enfatizando as energias renováveis e explicando suas fontes;
- b. Realização de pesquisa exploratória, levantamento bibliográfico para conhecimento do estado da arte no campo das energias, assim como maior entendimento sobre energia eólica e aerogeradores;
- c. Estudo e caracterização de materiais compósitos: processos de fabricação, propriedades e etc., enfatizando os polímeros reforçados por fibra de vidro;
- d. Pesquisa aplicada;

Na pesquisa aplicada foram realizados os seguintes procedimentos:

- a. Delimitação do tema enfatizando aplicação de ferramentas de design virtual;
- b. Definição das variáveis que influenciarão no desenvolvimento do objeto estudado, tais como forças contidas nos ventos, aspectos aerodinâmicos entre outros;
- c. Definição do perfil aerodinâmico através de pesquisa bibliográfica e ensaios virtuais conduzidos com *software* JavaFoil;
- d. Dimensionamento e modelagem da peça com auxílio do *software* Rhinoceros 3D da empresa Robert McNeel & Associates;
- e. Realização de um processo de validação da malha aplicada à geometria;
- f. Simulação computacional do comportamento do objeto utilizando o *software* Abaqus/CAE (Dessault Systèmes – Simulia, Providence, RI, USA);
- g. Aplicação de um critério de falha para o material da pá simulada;



- h. Avaliação dos resultados das simulações para diversas velocidades de vento e espessuras do objeto;
- i. Redimensionamento do material e realização de novas simulações para obter o melhor desempenho do material, sem falha.

#### 4. ANTEPROJETO E SIMULAÇÕES

O planejamento de determinados produtos engloba um ciclo de atividades onde algumas tomadas de decisões afetam diretamente o resultado. Uma boa estrutura de criação de um novo produto pode ser desenvolvida com a finalidade de minimizar as condições adversas. Para Kaminski (2000), o planejamento de um produto pode ser dividido nas seguintes fases:

- a) Estudo de viabilidade;
- b) Anteprojeto ou Projeto básico;
- c) Projeto executivo;
- d) Planejamento da produção/execução;
- e) Planejamento da disponibilização ao cliente;
- f) Planejamento do consumo ou utilização do produto;
- g) Planejamento do abandono do produto.

O estudo de viabilidade constitui a fase inicial. É a caracterização da natureza da necessidade e definição das formas de satisfazê-la. O anteprojeto ou projeto básico consiste na escolha da melhor proposta elaborada no estudo de viabilidade, é quando são realizados estudos e ensaios com modelos virtuais e protótipos. Segundo Kaminski (2000), os ensaios físicos ou matemáticos (analíticos ou numéricos) pretendem:

- Estabelecer variáveis dos parâmetros de projeto;
- Apresentar as características básicas dos componentes do produto;
- Mostrar a influência dos fatores internos e externos que agirão diretamente no desempenho do produto.

O projeto executivo é a fase onde já foram feitos ensaios, testes. Nessa etapa o produto está pronto para produção em série. A próxima fase é o planejamento dessa produção, onde são determinados os processos de fabricação, as linhas de montagem, recursos para matéria prima e mão de obra. O planejamento da disponibilização ao cliente trata da entrada do produto no

mercado, ou seja, como o produto pode chegar ao cliente da forma mais adequada, com embalagem adequada, em prazo adequado. O planejamento do consumo ou utilização do produto é a fase onde se deve levar em consideração a facilidade de manutenção, a segurança de operação, a interação homem-produto, a estética do produto, a durabilidade, a economia de operação, entre outros aspectos. O planejamento do abandono do produto constitui uma fase importante, pois o descarte de determinados produtos na natureza pode acarretar em problemas ambientais. O fim da vida útil de um produto pode ser examinado sob duas óticas: por deterioração física ou por obsolescência.

Todas essas fases são necessárias para desenvolvimento de um produto desde sua concepção inicial até o fim de sua vida útil ou sua reciclagem.

Para delimitar este trabalho, será tratada a fase de anteprojeto ou projeto básico com mais profundidade. A modelagem tridimensional e as simulações necessárias para o entendimento dos fenômenos inerentes ao objeto do trabalho (rotor de pequeno porte) serão realizadas com ferramentas computacionais.

#### 4.1. DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEIS DE PROJETO

As variáveis de projeto definidas para esta pesquisa são as forças contidas nos ventos e que podem ser aproveitadas para conversão em energia e a potência eólica.

##### 4.1.1. Forças contidas nos ventos

O vento constitui-se de massas de ar em deslocamentos causados principalmente pela diferença de aquecimento da terra pela radiação solar.

O vento captado por aerogeradores é aquele próximo à superfície terrestre. Esses ventos têm algumas características relevantes para seu aproveitamento. Uma delas é a mudança de característica em função da altura. Ao nível do solo o ar tende a não se deslocar, mas à medida que se afasta verticalmente, este tende a aumentar a velocidade. Conforme sobe em sentido normal a curvatura da Terra, o vento tende a intensificar a turbulência. Porém ao afastar-se da superfície, o vento tende a não ser mais perturbado pela rugosidade e a turbulência tende a

diminuir, mas não desaparecer. Nessas zonas mais afastadas da superfície terrestre o vento é denominado geostrófico.

O vento geostrófico ocorre a partir de aproximadamente mil metros de altitude, não sendo assim possível sua captação para uso com aerogeradores. A instalação de rotores de pequeno porte para uso residencial possivelmente terá pouca altura em relação ao nível do solo por fatores como custo de instalação de uma torre, necessidade de acesso para manutenção e questões estéticas. Geralmente será instalado acima do telhado da casa ou da cobertura do edifício de pavimentos.

A Figura 15 mostra a distribuição vertical do tipo de vento. Aerogeradores de pequeno porte estarão inseridos em uma região onde o regime de vento apresenta certa turbulência e tem seu comportamento ditado fortemente pela topografia da região. Segundo Hansen (2000), a rugosidade que influencia no comportamento do vento varia de acordo com a região. A tabela 8 apresenta valores para rugosidade em função do tipo de terreno. Esses valores podem ser interpretados como parâmetros que mostram que o maior valor de rugosidade encontra-se nas cidades, ou centros urbanos.

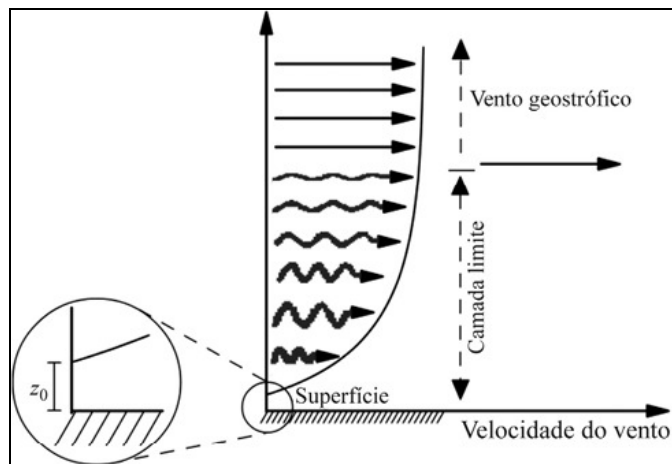


Figura 15 - Tipo de vento em função da altitude  
Fonte: Martins, Guanieri e Pereira (2008)

Tabela 8 – Altura de rugosidade em função do tipo de terreno

$z_0$ (m)	Tipo de terreno
1,0	Cidade
0,8	Floresta
0,2	Superfície c/ muitas árvores ou arbustos
0,1	Terreno com aparência fechada
0,05	Terreno com aparência aberta
0,03	Terreno com poucas construções, árvores e etc.
$5 \times 10^{-3}$	Campo vazio liso
$1 \times 10^{-3}$	Terreno com neve
$3 \times 10^{-4}$	Terreno com areia
$1 \times 10^{-4}$	Lago, rio, mar

Fonte: Hansen (2000)

Esse é um fator a ser considerado, pois indica que no projeto do equipamento deve-se prever turbulência para assegurar adequação estrutural e otimização do desenho do rotor para produção eficiente de energia.

No final da década de 1930, Waloddi Weibull, físico e engenheiro sueco publicou o trabalho: *The Weibull Distribution*, onde determina estatisticamente distribuições e probabilidades contínuas, utilizadas em estudo de tempo de vida de equipamentos. A Distribuição de Weibull usada na literatura específica sobre energia eólica diz respeito a uma distribuição estatística da velocidade do vento em uma região em função de sua frequência.

O estudo da distribuição de Weibull pode ser aprofundado para determinação de uma curva de potência do gerador eólico em função de sua localização, entretanto este parâmetro será desconsiderado no decorrer deste trabalho, pois se pretende estudar o desenvolvimento de um produto para ser utilizado em qualquer localidade.

#### 4.1.2. Potência eólica

Sabe-se que a energia cinética contida em uma massa de ar em movimento pode ser entendida conforme a equação (1), onde  $m$  é a massa e  $v$  é a velocidade; e a potência disponível

no vento dá-se pela equação (2), onde  $\rho$  é a densidade do ar e  $A$  a área da seção transversal onde percorre um fluxo de ar com velocidade  $v$ .

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

$$P_{dis} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Em meados da década de 20 o físico alemão Albert Betz desenvolveu pesquisas sobre fluxo de ar em tubos, testando interações de vento em hélices. Betz relacionou velocidade anterior e posterior ao anteparo das pás de um rotor e determinou que a potência máxima que uma turbina eólica pode obter é quando a velocidade do vento posterior as pás é 1/3 de sua velocidade anterior à interação com as pás. A equação (3) mostra a relação da potência retirada do vento com as velocidades anterior e posterior.

$$P_{ret} = \rho \frac{A v_1^3}{4} [(1+x)(1-x^2)] \quad (3)$$

sendo  $\rho$ , a densidade do ar,  $A$ , a área da seção transversal onde percorre um fluxo de ar (no caso do rotor eólico, significa a área varrida pelas pás) e  $x = \frac{v_3}{v_1}$ , onde  $v_1$  é a velocidade do vento anterior às pás,  $v_3$  a velocidade posterior as pás e  $v_2$  a velocidade no nível das pás.

Nota-se que o valor máximo da potência retirada é encontrado quando  $x = \frac{1}{3}$ , ou seja,  $v_3 = 1/3 v_1$ . Sendo assim, o aproveitamento máximo que se pode retirar de uma turbina eólica é da ordem de 59% ou, 16/27. Este valor é denominado Coeficiente de Potência máxima de Betz.

A velocidade específica representada na equação (4) por  $\lambda$ , que é um número adimensional e também conhecido como razão de velocidade de ponta de pá, é dada pela relação entre a velocidade de rotação na ponta da pá,  $v_u$ , e a velocidade  $v$  do vento. Essa velocidade específica será usada posteriormente na equação para determinar a corda da pá.

$$\lambda = \frac{v_u}{v} \quad (4)$$

A velocidade de rotação da pá  $v_u$  pode ser definida pelo produto da velocidade angular  $\omega$  da pá e o raio R desta, conforme (5).

$$v_u = \omega R \quad (5)$$

Desta forma, para se permanecer próximo à potência máxima de Betz (valor próximo a 0.59), o rotor deve ser capaz de operar ajustando-se a velocidades variadas do vento, variando sua velocidade angular para manter o  $\lambda$  constante, conforme Figura 16. Ou então deve ajustar em tempo real seu ângulo de passo  $\beta$  (ângulo formado entre a corda da seção transversal da pá e o plano de rotação da pá), conforme Figura 17.

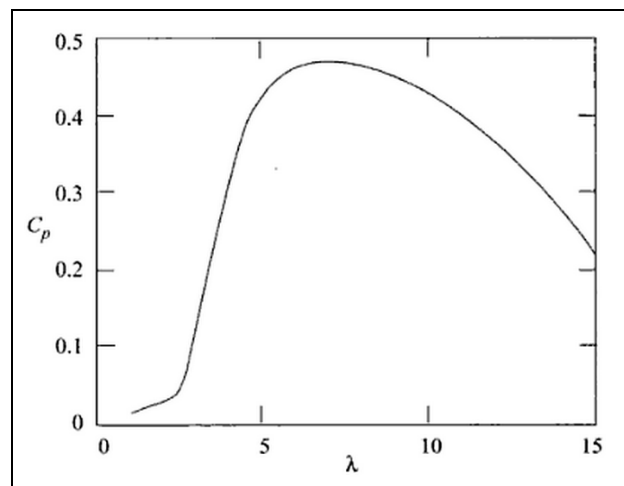


Figura 16 - Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica  
Fonte: Burton *et al* (2001)

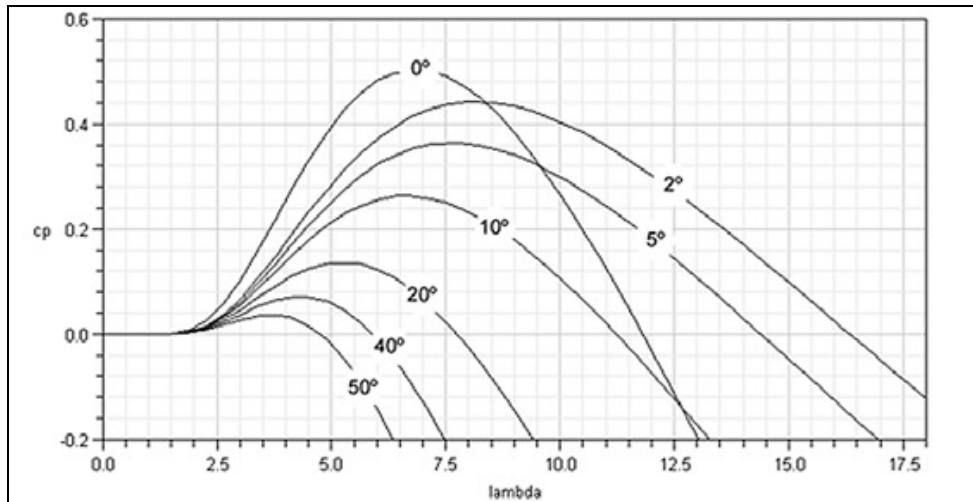


Figura 17 - Aproximação matemática do coeficiente de potência em função de  $\lambda$  e do ângulo de passo  
 Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30 (2008)

Para um rotor onde se pretende ter custo de fabricação reduzido, o controle ativo do ângulo de passo torna-se inviável. Outra forma de ajustar-se a equação (4) para manter o  $\lambda$  constante, independente da variação do vento, seria tornar a velocidade de rotação da pá ajustável em tempo real conforme o regime de vento. Mas esse artifício poderia também encarecer o equipamento. Assim a única maneira de ajustar o rotor com pás fixas para um aproveitamento eficiente da energia do vento é dimensionando as pás.

Uma maneira direta de maximizar a potência do rotor de pás fixas pode ser aumentando longitudinalmente a pá. Segundo a eq. (5), conforme se aumenta o raio do rotor (comprimento da pá), aumenta proporcionalmente a velocidade de rotação  $v_u$  independente da velocidade angular  $\omega$  da pá. Se a velocidade específica  $\lambda$  é a divisão entre velocidade de rotação e velocidade do vento, então no projeto do rotor, conforme se aumenta o comprimento da pá, aumenta a velocidade específica. Assim é possível ajustar o rotor, ou tamanho deste, para atingir coeficiente de potência máximo com regimes de ventos específicos. Por outro lado, para fixar o coeficiente de potência próximo ao limite de Betz, conforme Figuras 16 e 17, pode-se ajustar o ângulo de passo (representado por  $\vartheta$  na Figura 18) das pás do rotor.

A figura 18 descreve a relação entre velocidade, ângulos e plano de rotação da pá. A velocidade do vento no nível da pá  $v_2$  atua no sistema somando-se geometricamente à velocidade de rotação da ponta da pá  $v_u$ , formando a velocidade resultante  $v_r$ , conforme equação 6.



$$v_r = \sqrt{v_2^2 + v_u^2} \quad (6)$$

O ângulo formado entre a  $v_r$  e a corda do perfil aerodinâmico da pá é o ângulo de ataque  $\alpha$ , que determina o quanto de sustentação o perfil vai obter. O ângulo formado entre o plano de rotação da pá e a corda é o ângulo de passo  $\vartheta$ , que pode ser projetado para ser fixo ou variável. A força de sustentação  $F_l$  é uma força perpendicular à velocidade resultante  $v_r$ .

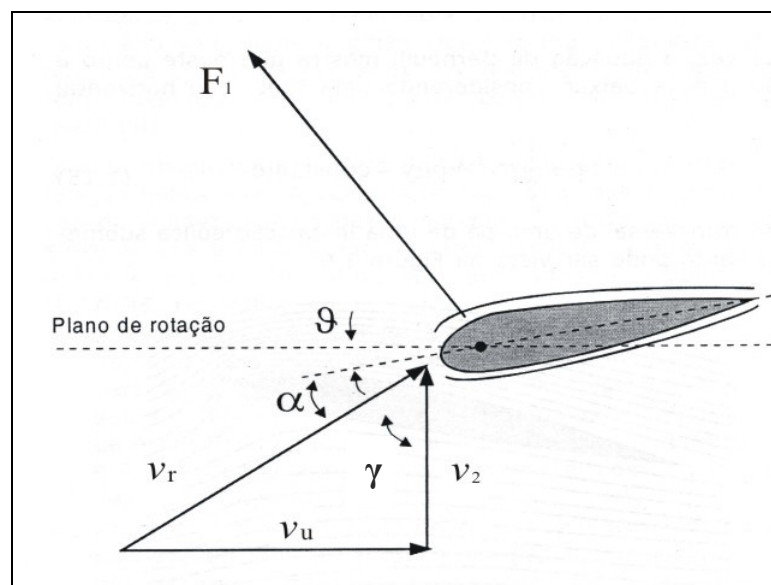


Figura 18 - Relação entre ângulos, força e velocidades em um perfil aerodinâmico  
Fonte: Carvalho (2003)

Quanto à segurança do sistema, existem duas formas de limitar a rotação demasiada das pás (prejudicial ao sistema), quando o rotor ultrapassa sua velocidade nominal: alterando o ângulo de ataque para valores próximos a zero (quando a corda da pá fica alinhada com a velocidade resultante) ou para valores tais que a corda da pá fique perpendicular à velocidade do vento, fazendo com que haja redução da força de sustentação<sup>6</sup> e aumento considerável na força de arrasto<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Força de sustentação é uma força que surge em função da diferença de pressão entre a parte inferior e a superior do aerofólio. É a força que move o rotor.

<sup>7</sup> Força de arrasto é uma força de resistência ao movimento de um objeto em relação a um fluido. É representada perpendicularmente em relação à sustentação e paralela à velocidade resultante.

No projeto do rotor de pequeno porte pode-se considerar o controle estol (pás com ângulo de passo fixo) atuando nas pás para redução de custo, maior eficiência e maior segurança.

Considerando que o regime de ventos da região onde será instalado o sistema pode ser conhecido através de mapas eólicos existentes, é possível dimensionar um rotor com controle estol. Em condições de ventos demasiadamente fortes, é possível obter, dependendo do desenho da pá, escoamento descolado na camada limite sobre a superfície da pá. Isso pode ocasionar perda aerodinâmica e conseqüentemente redução na velocidade de rotação.

Ao considerar o valor médio de ventos da região como igual ao valor ótimo para aproximação do limite de Betz; considerando também o valor máximo de vento para aplicação nesta pesquisa na ordem de 40m/s, é possível determinar dimensionamento adequado das peças que compõem o rotor, assim como os materiais das quais são fabricadas.

#### 4.2. DIMENSIONAMENTO E MODELAGEM

Com as variáveis de projeto definidas, torna-se possível dimensionar as pás do rotor eólico levando em conta os aspectos aerodinâmicos. Após esse dimensionamento, pode-se realizar a modelagem geométrica em três dimensões de uma pá.

Na figura 19 é apresentado o projeto de um aerogerador de pequeno porte, onde suas pás são os objetos de estudo desta pesquisa.

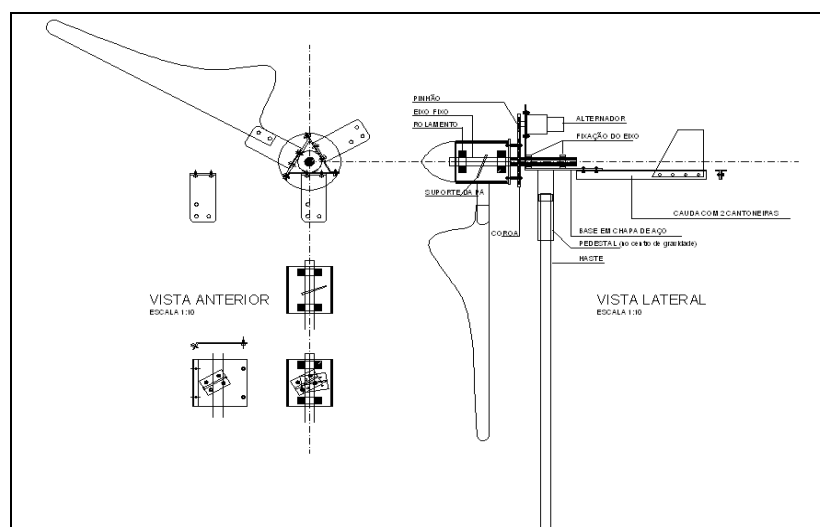


Figura 19 – Projeto gerador eólico de pequeno porte

#### 4.2.1. Perfil aerodinâmico

Perfis aerodinâmicos vêm sendo estudados há bastante tempo. Pesquisas relativas à dinâmica de fluidos e análise de escoamentos estão em constante evolução. As características aerodinâmicas de máquinas e equipamentos que operam em contato com escoamentos têm influência direta na qualidade com que desempenham suas funções (Petry, 2002).

O rotor eólico é formado por um conjunto de peças sólidas feitas para permitir uma quantidade de giro considerada ótima para transferir a um gerador elétrico. A transferência de giro é feita por um eixo e, em alguns casos, aumentada com auxílio de um conjunto de engrenagens.

As pás que fazem parte desse conjunto de peças são os elementos que entram em contato direto com a massa de ar em movimento. O momento de interação das pás com o vento é quando é transferida energia cinética do fluxo para superfície da pá.

O desenho ou projeto das pás é feito a fim de maximizar essa transferência de energia e transformar uma quantidade possível significativa em energia elétrica.

Diversas variáveis estão presentes quando se determina uma geometria onde se pretende obter comportamento controlado em contato com um fluido. Segundo Burton *et al* (2001) para se obter um desenho eficiente das pás, alguns objetivos devem ser satisfeitos:

- Maximizar a produção de energia para uma distribuição específica de vento;
- Procurar o limite de potência máxima;
- Resistência as cargas inerentes ao objeto e à possível fadiga que ocorrerá;
- Restringir a tendência de movimento da ponta da pá em direção à torre;
- Evitar ressonâncias;
- Minimizar peso e custo.

O projeto das pás do rotor deve levar em conta dois aspectos: aerodinâmico e estrutural. Dentro do aspecto aerodinâmico, podem-se listar algumas fases do processo de projeto:

- a. Definição do diâmetro do rotor;
- b. Definição da geometria do perfil aerodinâmico;

- c. Definição dos parâmetros aerodinâmicos (ângulo de passo, velocidades);
- d. Definição da geometria do perfil longitudinal da pá (corda e *twist*).

- a. Diâmetro do rotor

O rotor é formado pelas partes que permitem a rotação do eixo que transmitirá giro ao gerador. As pás são os principais elementos que formam o rotor. O diâmetro do rotor está diretamente relacionado ao desempenho do aerogerador. Sendo assim, o comprimento da pá será definido pela potência que se pretende retirar do ar e converter em energia elétrica.

- b. Geometria do perfil aerodinâmico

Existem diversos aerofólios desenhados para utilização em turbinas eólicas. Porém a maioria destes originou-se de projetos de asas de aeronaves.

Nesta pesquisa foi definido o coeficiente de sustentação  $C_l$ , que é a capacidade que um aerofólio tem de sustentar-se em relação a uma velocidade de vento, como principal parâmetro de eficiência do perfil a ser escolhido. O coeficiente de arrasto  $C_d$  (resistência aerodinâmica) também foi considerado na análise, pois para o caso de um rotor de pequeno porte é preciso definir a razão adequada entre sustentação e arrasto para controlar a velocidade resultante entre velocidade angular e velocidade do vento.

Conforme apresentado na figura 20, quanto mais aumenta a velocidade específica  $\lambda$ , mais necessário se torna ter um desenho que potencialize a sustentação (L).

A análise do perfil foi conduzida com auxílio do *software* JavaFoil, disponível no *website* do professor Dr. Martin Hepperle, da Universidade de Stuttgart, Alemanha. Esse *software* foi desenvolvido em linguagem Java e tem sua utilização principal em análises de perfis de asas para modelos de aeronaves. Alguns conceitos de aerodinâmica aplicados para perfis de asas de aviões podem ser aplicados em análise de pás para aerogeradores.

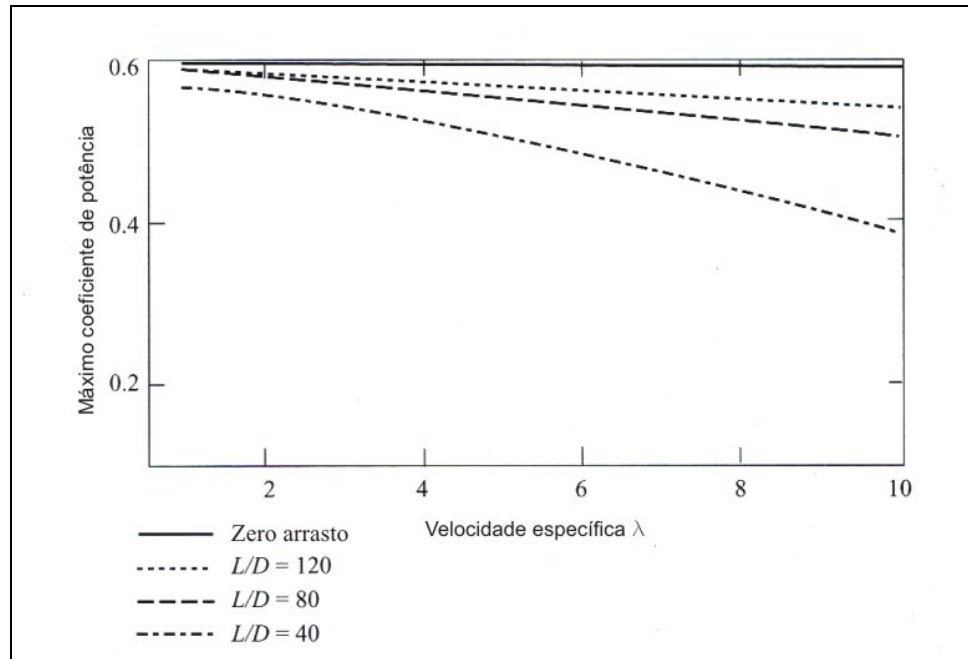


Figura 20 - Sustentação (L) e arrasto (D) em função do coeficiente de potência e da velocidade específica  $\lambda$   
 Fonte: Burton *et al* (2001)

O JavaFoil constitui uma ferramenta importante que pode ser utilizada na análise de perfis aerodinâmicos, entretanto para se obter resultados com alto nível de confiabilidade, torna-se necessário adquirir dados experimentais sobre os perfis analisados e comparar com os dados do *software*. Nesta pesquisa não foram adquiridos dados experimentais, pois os modelos geométricos testados foram modelos virtuais.

Os perfis aerodinâmicos mais comumente utilizados para asas de aeronaves e também para pás de aerogeradores são os do tipo NACA (*National Advisory Committee for aeronautics*) ou Comitê Nacional para Aconselhamentos sobre Aeronáutica. Perfis NACA são desenvolvidos por uma série de relações geométricas intrínsecas ao perfil. Normalmente os perfis NACA são identificados por algarismos que representam suas relações geométricas.

Apesar de os perfis NACA aparecerem mais freqüentemente nas pesquisas relacionadas com aerodinâmica, o perfil inicialmente escolhido para modelagem e simulação nesta pesquisa foi o MH110, desenvolvido por Martin Hepperle para pás de aerogeradores de eixo horizontal e com controle tipo estol. Este perfil foi escolhido para modelagem geométrica e simulação estrutural por estar disponível para utilização em pesquisas acadêmicas e também porque facilita o uso do JavaFoil por estar disponível já em pontos de coordenadas utilizadas por esse *software*.

O perfil é desenhado a partir de pontos de coordenadas em duas dimensões, disponibilizados no site de Martin Hepperle, conforme tabela 9.

Tabela 9 – Pontos de coordenadas do perfil MH110

x	y
1.00000000	0.00000000
0.99653679	-0.00000839
0.98640394	0.00020868
0.97015295	0.00088858
0.94817712	0.00187970
0.92061713	0.00312964
0.88774439	0.00482284
0.85005668	0.00710281
0.80812280	0.01002942
0.76257153	0.01361933
0.71407609	0.01783903
0.66333945	0.02260907
0.61107819	0.02780629
0.55800744	0.03326766
0.50482605	0.03879780
0.45220316	0.04417530
0.40076651	0.04916328
0.35109229	0.05351815
0.30369808	0.05700000
0.25903745	0.05938370
0.21749907	0.06046023
0.17940788	0.06005282
0.14504302	0.05792865
0.11434721	0.05380340
0.08696462	0.04785904
0.06286228	0.04069252
0.04230701	0.03279183
0.02555418	0.02451705
0.01281496	0.01623683
0.00429649	0.00837148
0.00211665	0.00545033
0.00096208	0.00340260
0.00023711	0.00150577
0.00001434	0.00034898
0.00006123	-0.00067806
0.00045103	-0.00165194
0.00116088	-0.00266955
0.00269267	-0.00425311
0.00473182	-0.00589158
0.01020191	-0.00928503
0.02329198	-0.01496193
0.04120440	-0.02035040
0.06381301	-0.02526009
0.09094732	-0.02958794
0.12236865	-0.03326391

0.15780899	-0.03623346
0.19695727	-0.03849081
0.23943286	-0.04006268
0.28478797	-0.04097415
0.33254591	-0.04124334
0.38220182	-0.04089743
0.43324080	-0.03996525
0.48514078	-0.03851948
0.53730757	-0.03665724
0.58911977	-0.03440665
0.64003009	-0.03178595
0.68950142	-0.02887417
0.73697819	-0.02575203
0.78192326	-0.02249320
0.82382388	-0.01917110
0.86219604	-0.01586085
0.89658864	-0.01263340
0.92658689	-0.00956236
0.95181035	-0.00668459
0.97203228	-0.00402294
0.98711684	-0.00181207
0.99667613	-0.00043813
1.00000000	0.00000000

Fonte: Martin Hepperle – MH110 *free profile*, (2004)

Após inserir as coordenadas, é possível visualizar a forma do perfil (fig.21).

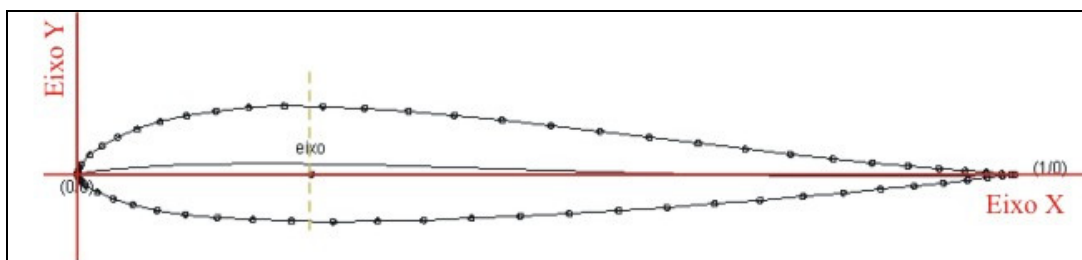


Figura 21 – Forma do perfil aerodinâmico MH 110

Esse perfil foi criado a partir de 68 pontos de coordenadas cartesianas. A espessura máxima ( $t/c$ ) do perfil é 11,959% da corda e está a 26,2% no eixo  $x$ . A curvatura ( $f/c$ ), que é a linha curva média entre o bordo superior e o bordo inferior do perfil tem valor máximo de 1,088% a 22,7% no eixo  $x$ . A figura 22 mostra na tela de modificações do *software* JavaFoil os dados descritos acima.

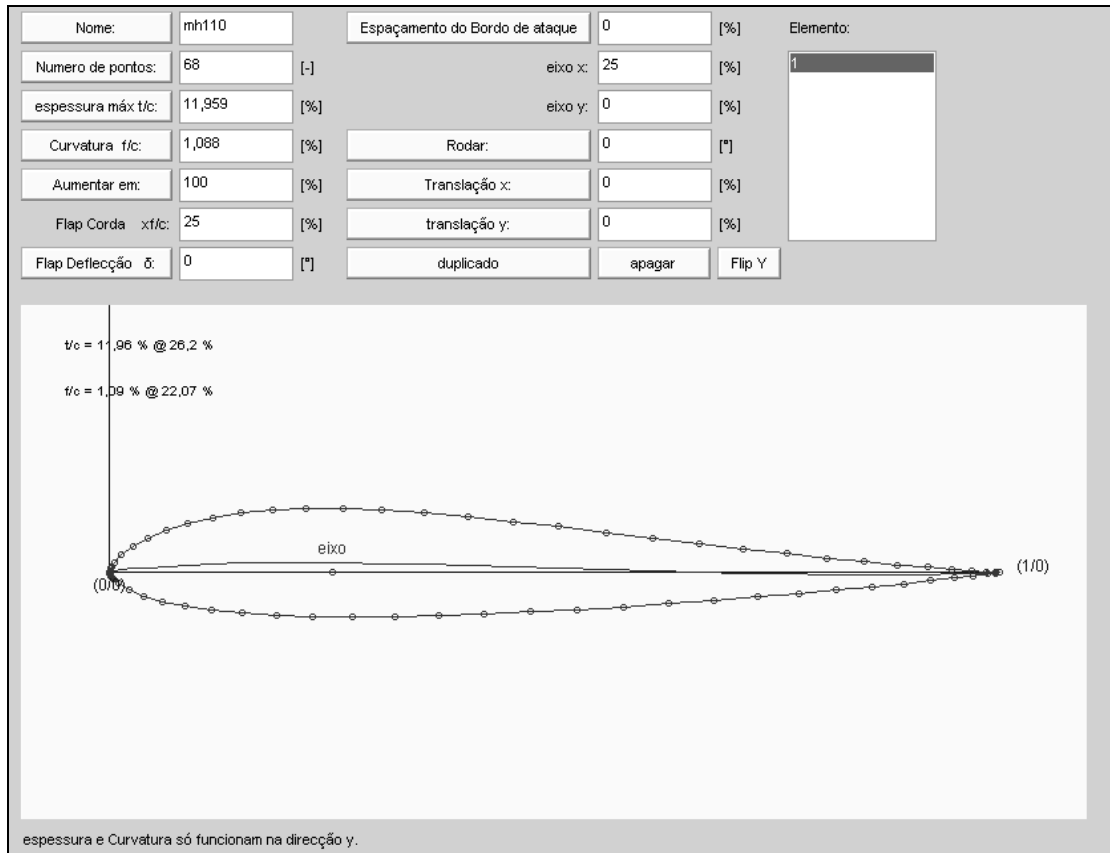


Figura 22 – Análise do perfil MH110 no JavaFoil

Com o perfil criado, é possível determinar para qual ângulo de ataque o perfil terá melhor relação sustentação sobre arrasto.

Para análise de asa de aeronave (com certa simplificação), o ângulo de ataque está diretamente ligado às variáveis listadas acima, pois a asa de avião está interagindo somente com uma direção de vento, ou seja, o cálculo é feito pelo deslocamento da asa e não pelo deslocamento do fluido (vento).

Já no caso do rotor eólico, existem duas componentes a serem consideradas: o vento e a rotação. A partir de uma velocidade que é o resultado de uma soma geométrica dessas duas velocidades é que pode ser determinado o ângulo de ataque. Assim o ângulo de ataque para aerogeradores de pás fixas não é constante como em asas de avião. O que se têm fixo é o ângulo de passo.



Dessa maneira fica clara a importância da adequação do desenho das pás para se chegar a um ângulo de ataque tal que permita maior sustentação.

### c. Parâmetros aerodinâmicos

A partir do perfil MH110 definido, é possível utilizar *software* JavaFoil para se extrair os coeficientes de sustentação  $C_l$  e de arrasto  $C_d$  para o perfil analisado. A tabela 10 apresenta os coeficientes de sustentação, de arrasto e a relação entre eles, para ângulos de ataque de 0 a 10 graus, com incremento de 1 grau.

A tabela 10 mostra que o maior valor de  $C_l$  está para ângulo de ataque  $10^\circ$ , entretanto deve ser considerada a melhor relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto ( $C_l/C_d$ ). Logo o ângulo de ataque  $\alpha$  mais adequado para esse perfil é  $8^\circ$ .

Considerando que a pá é projetada para uma velocidade de vento pré-determinada, é possível calcular sua velocidade de rotação e conseqüentemente a velocidade resultante. Com a velocidade resultante conhecida, é possível desenhar a pá com ângulo de passo local (que é fixo) tal que permita chegar ao ângulo de ataque desejado, pois o ângulo de ataque pode ser encontrado com a subtração do ângulo formado entre a velocidade resultante  $v_r$  e plano de rotação da pá e o ângulo de passo local da pá (ver figura 18).

Tabela 10 – Parâmetros em função do ângulo de ataque

$\alpha$ [°]	$C_l$ [-]	$C_d$ [-]	$C_l/C_d$ [-]
0,0	0,017	0,02460	0,6911
1,0	0,103	0,02491	4,1349
2,0	0,223	0,02422	9,2073
3,0	0,343	0,02328	14,7337
4,0	0,462	0,02500	18,4800
5,0	0,581	0,02667	21,7848
6,0	0,676	0,02644	25,5673
7,0	0,769	0,02677	28,7262
<b>8,0</b>	<b>0,856</b>	<b>0,02876</b>	<b>29,7636</b>
9,0	0,923	0,03577	25,8037
10,0	0,977	0,04411	22,1492

#### d. Perfil longitudinal da pá

A geometria do perfil longitudinal da pá varia de acordo com o diâmetro do rotor, com o número de pás, com o coeficiente de sustentação e com a velocidade específica  $\lambda$ .

Segundo Gasch e Twele (2002), existe uma maneira de determinar a corda da pá em função de seu raio local, ou seja, de acordo com a distância relativa do eixo do rotor. A equação (7) define a corda local para cada seção  $r$  da pá, considerando o limite máximo de Betz.

$$c(r) = \frac{2\pi R}{n} \frac{8}{9} \frac{1}{C_l \lambda^2} \frac{r}{R} \quad (7)$$

Na Eq. (7),  $R$  é o raio do rotor,  $n$  representa o número de pás do rotor,  $C_l$  é o coeficiente de sustentação,  $\lambda$  é a velocidade específica e  $r$  é o raio local.

A partir de uma análise rápida dessa equação é possível perceber algumas relações de proporções: quanto maior for o rotor, maior será a corda das pás; a corda reduz com o acréscimo de pás no rotor; o coeficiente de sustentação é inversamente proporcional à corda, logo quanto maior for o coeficiente de sustentação, menor terá de ser a corda da pá. É possível perceber também que quanto maior a velocidade específica  $\lambda$ , menor será a corda; e finalmente pode-se concluir que quanto mais próximo da raiz, maior será a seção transversal da pá.

A pá projetada para essa pesquisa foi seccionada em 18 partes para possibilitar sua modelagem utilizando a eq. (7). Assim, para cada raio local foi calculada a corda do perfil transversal. A velocidade específica, ou razão de velocidade de ponta de pá foi considerada 6. Segundo Stankovic, Campbell e Harries (2009), a razão de velocidade de ponta de pá normalmente aplicada a turbinas que utilizam a força de sustentação, é em torno de 6 ou 7.

Resolvendo-se a eq. (7) para dezoito seções da pá, têm-se as medidas de corda como mostra a Figura 23.

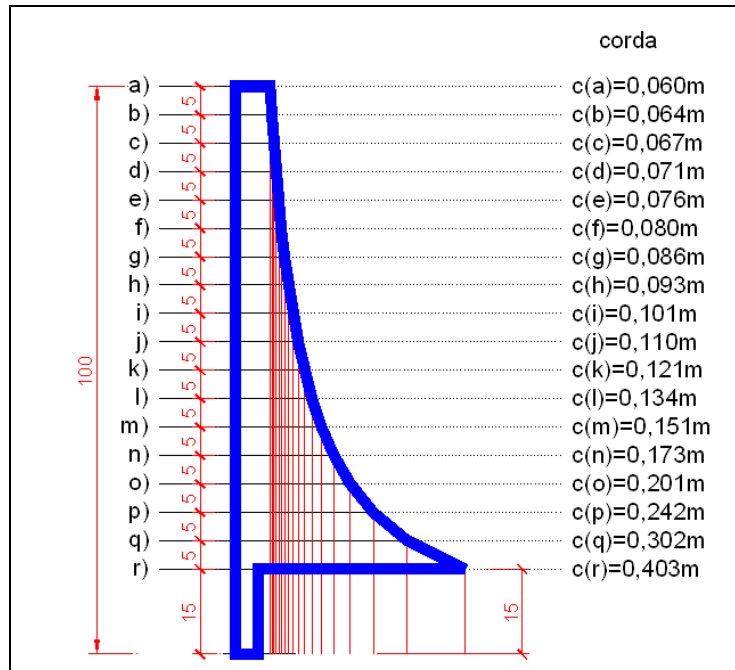


Figura 23- Dimensões da corda  $c$  da pá para as seções definidas

A figura 23 apresenta um modelo ideal de acordo com conceitos aerodinâmicos para o rotor em estudo. Esse modelo leva em conta maior eficiência na operação do objeto. Entretanto é preciso considerar a pá como produto para fabricação, e como tal, deve possuir dimensões que facilitem esse processo. Isso ajudará também na redução do custo de fabricação. Por esse motivo foi feita uma suavização no modelo 2D da pá, apresentado na figura 24.

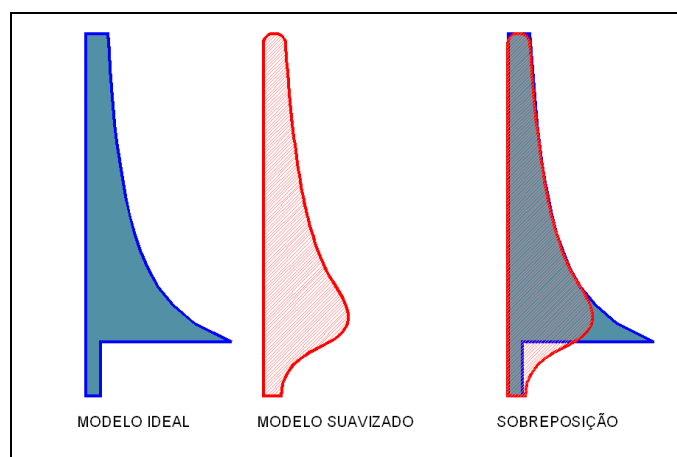


Figura 24 – Suavização da pá

Ainda segundo Gasch e Tvele (2002), a torção da pá  $\beta$  (*twist*) pode ser definida conforme as Eqs. (8) e (9)

$$\beta(r) = \gamma(r) + \alpha_A(r) \quad (8)$$

$$\gamma(r) = \arctan\left(\frac{3}{2} \frac{r}{R} \lambda_D\right) \quad (9)$$

onde  $\gamma$  representa o ângulo entre a velocidade resultante do vento (soma geométrica entre a velocidade do vento e a velocidade de rotação da pá) e a velocidade de rotação da pá. E  $\alpha$  é o ângulo de ataque, conforme fig. 18.

Entre outros objetivos, a torção da pá permite manter o perfil no ângulo de ataque ótimo. Conforme se aproxima da ponta, essa torção tende a reduzir e o perfil tende a ter sua corda paralela à velocidade de rotação, que na ponta é maior que a velocidade do vento. Por outro lado, a parte próxima a raiz da pá tende a ter corda maior e torção também maior.

As figuras 25 e 26 apresentam as seções e seus respectivos ângulos de passo ao longo da pá. O círculo azul na figura 25 representa a raiz, e o menor perfil (cor magenta) representa a ponta da pá. A maior seção, ou perfil, apresenta corda 0,403m e ângulo de passo 28,521°, conforme fig. 25. Esta seção está a 0,15m da raiz da pá. Este desenho representa um modelo ideal.

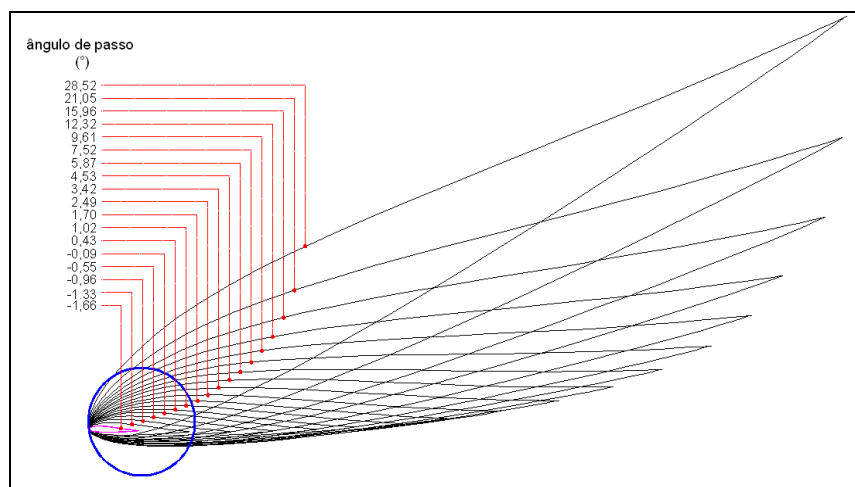


Figura 25- Ângulos de passo calculados para cada seção da pá

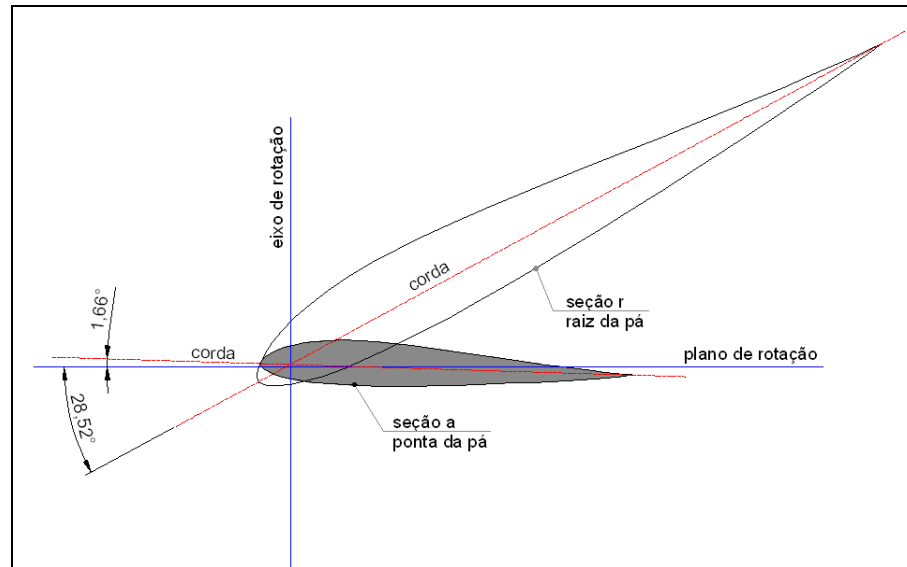


Figura 26- Primeiro e último ângulos de passo da pá

A pá deve ser projetada para proporcionar um escoamento menos turbulento do fluxo de ar com a qual está interagindo. Dessa maneira torna-se necessária uma compatibilização entre a forma resultante dos cálculos de corda e torção e a superfície que se pretende ter. Nota-se que o escoamento junto a esta deve ser bastante laminar e ter o mínimo de turbulência. Para atingir esse objetivo, torna-se necessária uma possível suavização na geometria da pá. Deve ser levado em conta que esse processo pode proporcionar perdas aerodinâmicas assim como possibilitar o surgimento de regiões com tensões desnecessariamente elevadas na pá. A análise pelo método dos elementos finitos pode contribuir revelando possíveis locais onde elevados esforços podem causar dano à peça.

#### 4.2.2. Modelagem geométrica em três dimensões

Na modelagem 3D foram utilizados os dados obtidos na fase anterior, como perfil aerodinâmico escolhido com auxílio do *software* JavaFoil, comprimento da pá, corda da pá de acordo com a figura 23 e torção (*twist*) conforme o método apresentado anteriormente (figuras 25 e 26). Alguns dados obtidos no dimensionamento da pá são apresentados na tabela 11.

Para essa atividade de modelagem foi definido o *software* Rhinoceros 3D. O Rhino trabalha com objetos NURBS (Non Uniform Rational B-spline). Com esse *software* pode-se modelar e editar curvas, superfícies e sólidos não regulares com precisão.

Tabela 11 – especificações para modelagem da pá

Local - $r/R$ (m)	Corda (m)	Espessura (m)	Ângulo de passo (°)
1	0,060	0,0070	-1,66
0,95	0,064	0,0075	-1,33
0,90	0,067	0,0080	-0,96
0,85	0,071	0,0085	-0,55
0,80	0,076	0,0091	-0,09
0,75	0,080	0,0096	0,43
0,70	0,086	0,0103	1,02
0,65	0,093	0,0111	1,70
0,60	0,101	0,0121	2,49
0,55	0,110	0,0132	3,42
0,50	0,121	0,0145	4,53
0,45	0,134	0,0160	5,87
0,40	0,151	0,0181	7,52
0,35	0,173	0,0207	9,61
0,30	0,201	0,0241	12,32
0,25	0,242	0,0290	15,96
0,20	0,302	0,0362	21,05
0,15	0,403	0,0483	28,52

De posse desses dados é possível iniciar um desenho em 2D da pá, conforme figura 27.

A partir do modelo 2D é possível se utilizar de ferramentas do *software* para gerar modelos volumétricos. Com o modelo 2D pronto, foram criados as seções do perfil aerodinâmico MH110, as respectivas cordas e torção (*twist*) de cada seção de acordo com as equações 7, 8 e 9. (fig. 28).

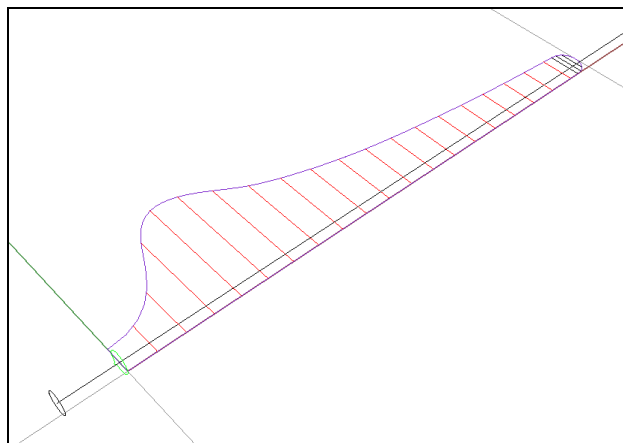


Figura 27- Modelo 2D da pá

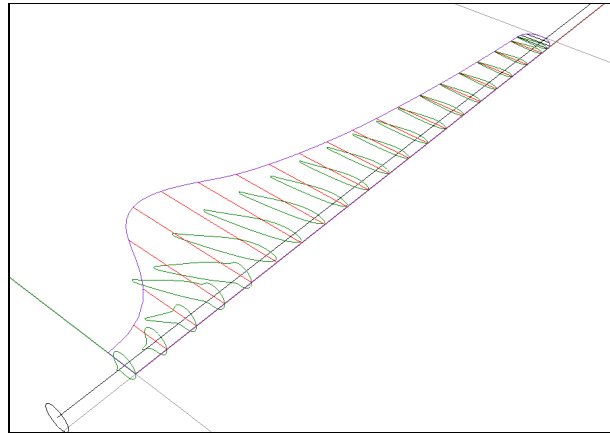


Figura 28- Modelo com perfil aerodinâmico e *twist*

Posteriormente, com algumas ferramentas do *software* como os comandos *cross section profile* e *loft* pode-se criar a casca em 3 dimensões. A figura 29 mostra, de diversos ângulos, a pá com superfície e as linhas de construção.

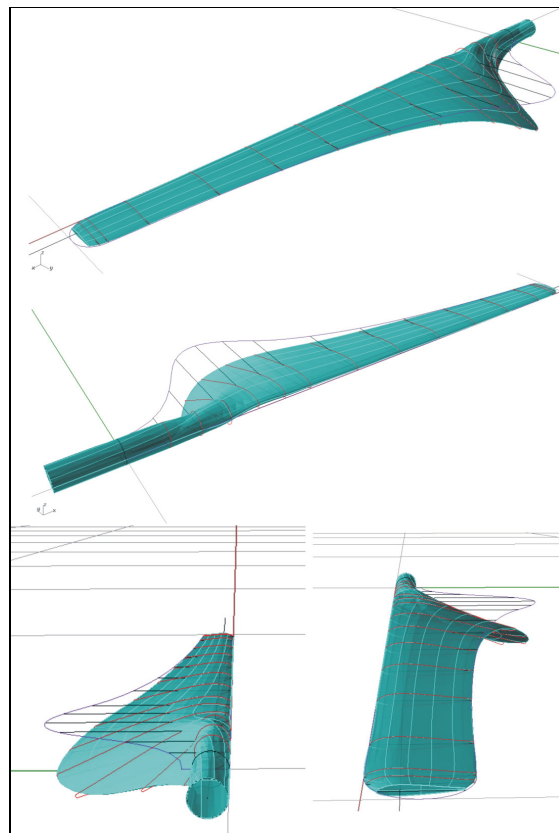


Figura 29- Pá com superfície

A torção (*twist*) da pá é mostrada na figura 30, onde o círculo perfeito representa a raiz e o perfil menor, alinhado com o eixo horizontal, representa a ponta da pá.

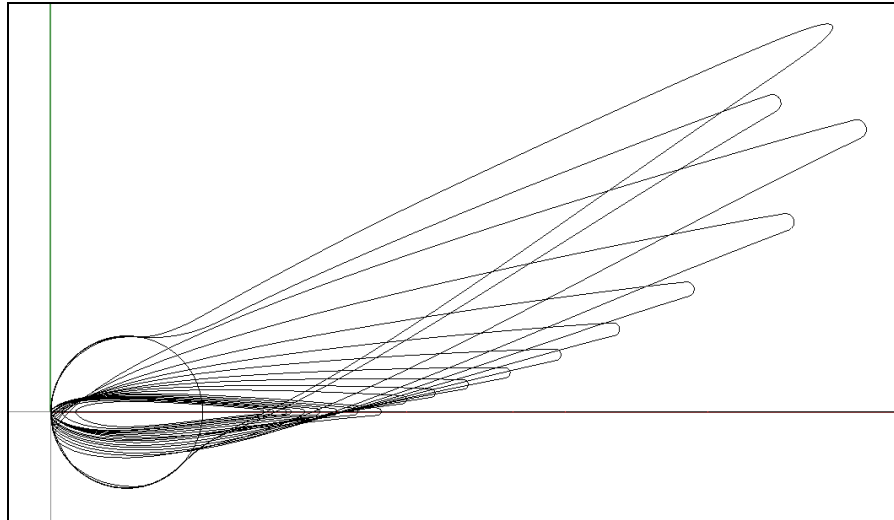


Figura 30 - Torção do perfil

#### 4.3. SIMULAÇÕES PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF), segundo Kaminski (2008), pode ser entendido como uma ferramenta pela qual são simuladas estruturas submetidas a cargas para se conhecer seu comportamento.

Os passos necessários para se trabalhar com esse método podem ser entendidos como:

- a) Criação do modelo geométrico computacional;
- b) Análise do modelo;
- c) Análise dos resultados;
- d) Modificações, atualizações e análises dos modelos e dos resultados.

Para a criação do modelo é necessário ter uma idéia conceitual com intenções de atendimento aos requisitos de projeto, e uma geometria associada a esse projeto conceitual.



Geralmente os modelos são criados em *software* CAD e exportados para *software* CAE. No *software* de elementos finitos são definidos os parâmetros como propriedades dos materiais, condições de contorno, forças a que o objeto em estudo estará submetido, geração de malha de elementos e processamento da simulação. O refinamento dessa malha significa mais precisão na análise. O tamanho e quantidade dos elementos de malha também serão definidos pela capacidade de processamento do computador onde está sendo rodado o *software*.

A análise do modelo é feita em um sistema, automaticamente pelo *software*. São executadas e resolvidas uma quantidade de equações proporcional à complexidade da análise. Esse procedimento é feito geralmente diretamente pelo programa, sem a intervenção do usuário.

Para Kaminski (2008), a análise dos resultados é a parte mais importante do procedimento. É quando o projetista ou usuário do *software* se depara com os resultados apresentados. Essa análise pode ser feita de duas formas: visual e matemática. A análise visual pode dar indícios sobre regiões de tensões máximas, ou de deslocamentos excessivos. Essa análise também pode mostrar as deformações da geometria em decorrência das cargas e condições de contorno aplicadas. A análise matemática pode ser aplicada para relacionar os valores limites de resistência dos materiais conhecidos em tabelas ou normas com os obtidos na simulação. Assim é possível aplicar um coeficiente de segurança e redimensionar a peça para fins de economia e segurança.

O item d) dos passos listados acima diz respeito às modificações e/ou atualizações de geometrias já analisadas com objetivo de garantir maior eficiência na estrutura simulada.

Esse processo todo pode ser repetido inúmeras vezes, com inúmeras modificações nos parâmetros e variáveis inerentes ao objeto simulado.

A figura 31 apresenta um diagrama para análise estrutural estática das pás modeladas para esta pesquisa. Este modelo representa um sistema fechado, iniciando a partir de uma geometria pronta e inalterável (não quer dizer que a espessura do material não possa ser alterada diretamente no *software* de análise estrutural). Definem-se as condições de contorno e as forças em que será submetido o objeto. Definem-se os materiais e suas propriedades. Faz-se a simulação estrutural e se obtém resultado do comportamento do objeto. A simulação pode ser feita com análise de falha do material empregado no objeto. Se o material falhar, altera-se espessura de camada ou número de camada do material e retorna-se à simulação. Se o material não falhar, existem três possibilidades: a) reduzir a espessura e/ou o número de camadas do material e

submeter novamente à simulação; b) aceitar o objeto como está; c) realizar análise para ciclos de uso, considerando envelhecimento do material.

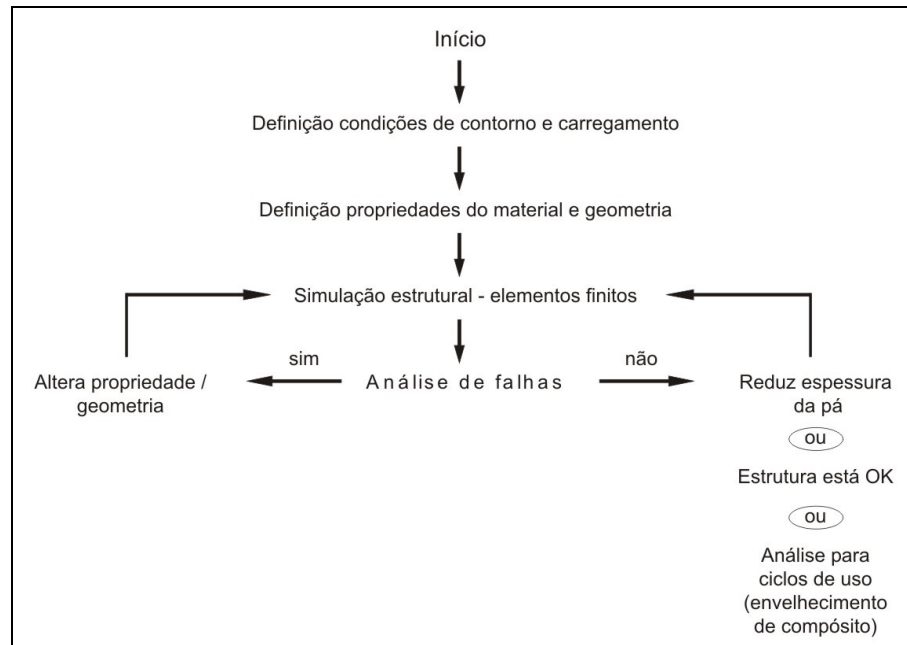


Figura 31 – Diagrama para análise da pá

A simulação virtual é uma prática eficiente e de baixo custo, que pode propiciar uma investigação apurada do comportamento do modelo estudado.

Para realizar a simulação nesta pesquisa foi utilizado o *software* de engenharia assistida por computador Abaqus/CAE (*computer-aided engineering*). Segundo Kaminski (2008), o objetivo da análise estrutural pelo método dos elementos finitos é verificar um produto modelando seu comportamento antes mesmo de sua fabricação.

#### 4.3.1. Propriedades do material e condições de contorno

O material escolhido para as pás é um material compósito e será considerado como tendo comportamento elástico. As camadas do material podem ser dispostas com diferentes orientações para as fibras. A matriz é epóxi e as fibras são de vidro tipo E. Dessa forma foram consideradas as seguintes propriedades elásticas (conforme tabela 12):

- $E_1$  - módulo de elasticidade na direção das fibras = 45 GPa;

- $E_2$  - módulo de elasticidade na direção transversal as fibras = 12 GPa;
- $\nu_{12}$  - coeficiente de Poisson = 0,19
- $G_{12}$  - módulo de cisalhamento no plano 1-2 = 5,5 GPa;
- $G_{13}$  - módulo de cisalhamento no plano 1-3 =  $G_{12} = 5,5$  GPa (simplificação)
- $G_{23}$  - módulo de cisalhamento no plano 2-3 =  $G_{12} = 5,5$  GPa (simplificação).

Tabela 12 - Propriedades dos compósitos reforçados por fibras unidirecionais

Propriedades	Fibra de vidro E/ Epóxi	Fibra de vidro S/ Epóxi	Epóxi/ Poliéster isoftálico	Kevlar 49 /Epóxi	Carbono /Epóxi AS4/3501-6	Carbono/ Epóxi T800/2900 -2	Carbono/ Epóxi IM7/8551-7	Carbono/ PEEK AS4/APC2	Carbono/P oliamida AS4/Avimi dK-III
Densidade [g/cc]	2.076	1.993	1.85	1.380	1.58	-	-	1.6	-
Módulo longitudinal E1 [GPa]	45	55	37.9	75.8	142	155.8	151	138	110
Módulo transversal E2 [GPa]	12	16	11.3	5.5	10.3	8.89	9.0	10.2	8.3
Módulo de cisalhamento G12 [GPa]	5.5	7.6	3.3	2.07	7.2	5.14	5.6	5.7	-
Coeficiente de Poisson $\nu_{12}$	0.19	0.28	0.3	0.34	0.27	0.3	0.3	0.3	-
Resistência à tração longitudinal F1t [MPa]	1020	1620	903	1380	1830	2698	-	2070	-
Resistência à tração transversal F2t [MPa]	40	40	40	34.5	57	-	-	86	37
Resistência ao cisalhamento F6 [MPa]	60	60	40	44.1	71	-	-	186	63
Resistência à compressão longitudinal F1c [MPa]	620	690	357	586	1096	1691	-	1630	1000
Resistência à tração longitudinal F2c [MPa]	140	140	68	138	228	-	-	-	-
Resistência ao cisalhamento (F4 or F5) [MPa]	60	80	76	48.6	-	-	-	150	-
Tensão de deformação longitudinal $\epsilon_{1t}$ [%]	2.3	2.9	2.4	1.8	1.29	1.68	1.64	1.45	-
Longitudinal CTE $\alpha_1$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	3.7	3.5	6.5	-2.0	-0.9	-	-	0.5	-
Transversal CTE $\alpha_2$ [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	30	32	22	60	27	-	-	30	-
Expansão longitudinal $\beta_1$	0	0	0	0.01	0	0.0095	-	-	-
Expansão transversal $\beta_2$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.321	-	-	-
Fração de volume de fibra Vf [%]	60	60	50	60	60	-	57.3	61	-
Conteúdo de vazios Vv [%]	-	-	2.0	-	-	-	0.1	-	0.5
Desalinhamento de fibras $\theta$ [deg]	-	-	3.53	-	-	-	-	-	-

Fonte: Barbero (1998)

Para um melhor entendimento, a Figura 32 mostra os principais planos de uma lâmina de material compósito.

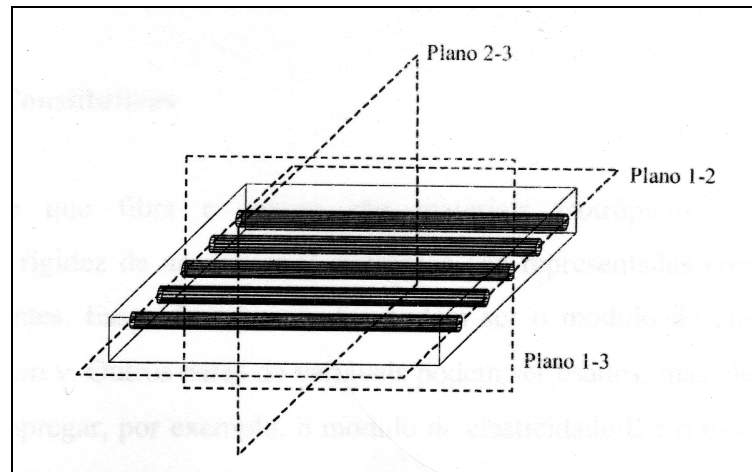


Figura 32 - Planos principais de uma lâmina de material compósito  
Fonte: Oliveira BF, Creus GJ. (2000)

Após estabelecer as propriedades desse material empregado na simulação, foi criada a seção tipo *Shell* homogêneo para a pá em fibra de vidro. Nesse momento foram estabelecidas duas camadas para a pá. As fibras foram dispostas na direção longitudinal da pá.

Seguindo o procedimento no *software* Abaqus, foi criado um passo estático, pois será feita apenas análise estrutural estática do modelo.

A condição de contorno, com os seis graus de liberdade restringidos, foi atribuída na raiz da pá, como apresentado na figura 33. Essa condição é imposta porque a pá é fixa no eixo do rotor.

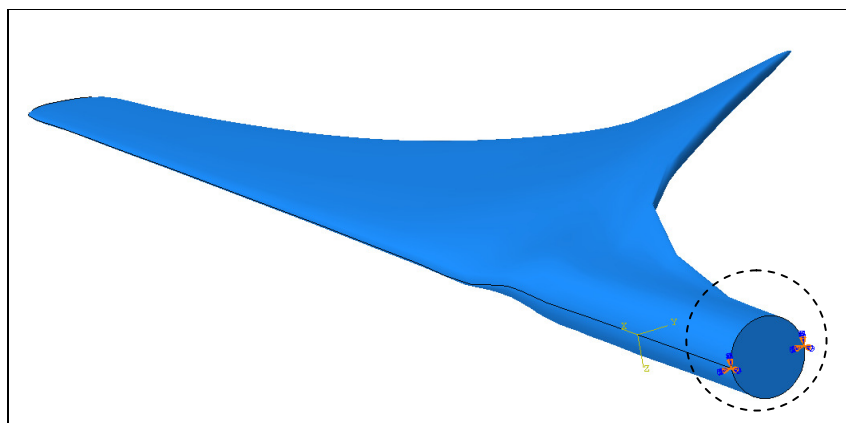


Figura 33 – Pá modelada e com e condição de engaste na raiz

#### 4.3.2. Cargas que atuam na pá

As cargas que atuam na pá em decorrência da interação com o fluxo de ar são as forças aerodinâmicas. Assumindo-se que a velocidade aparente  $v_r$  (velocidade resultante) seja constante em  $dr$ , existe uma distribuição de força na pá quando ela está em operação. Essa distribuição se dá de duas formas: empuxo (Eq. 10 e 12) e força rotacional (Eq. 11 e 13) (Gasch e Tvele, 2002). Nestas equações  $\rho$  representa a densidade do ar, considerada  $1,29\text{kg/m}^3$  ao nível do mar,  $c$  é a corda da pá e  $dr$  é a componente que representa a espessura infinitesimal do anel considerado para o cálculo da área de varredura da pá, onde haverá a interação da velocidade rotacional e o vento.

$$dT = \frac{1}{n} \left( \frac{8}{9} \frac{\rho}{2} v_r^2 \right) 2\pi r dr \quad (10)$$

$$dU = \frac{2\pi R}{n\lambda_D} \left( \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} v_r^2 \right) dr \quad (11)$$

Considerando que a variável  $r$  está na direção de  $x$  na simulação realizada, substituindo os valores apropriados e integrando a equação, chega-se ao equacionamento para a força de empuxo agindo sobre a pá.

$$T = \int_x dT = 36860 x^3 \quad (12)$$

Para a força rotacional, considerando os valores acima mencionados, além de  $\lambda$  (razão de velocidade de ponta de pá) = 6, tem-se a força rotacional agindo sobre a pá.

$$U = \int_x dU = 8191,22 x^2 \quad (13)$$

As forças de empuxo e rotacional foram atribuídas no modelo da pá conforme apresentado na figura 34, onde aparece também o engaste na raiz.

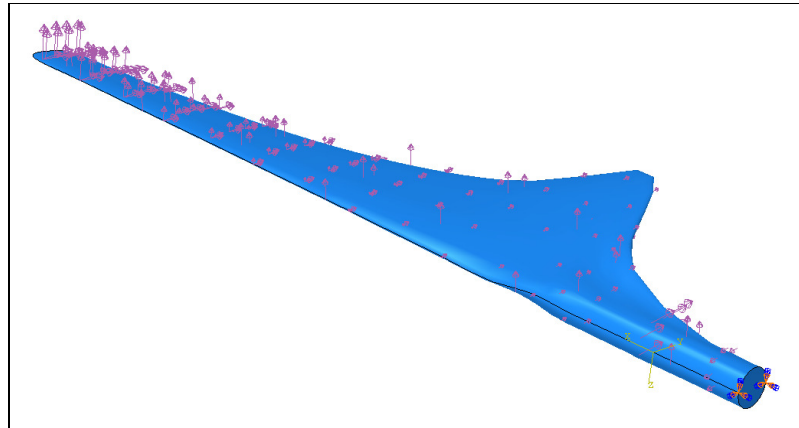


Figura 34 – Pá com atribuição das forças aerodinâmicas

Existem também forças de rajadas de vento, ocasionando variação na  $dT$  e elevada pressão instantânea na pá, entretanto se o empuxo for calculado com a velocidade resultante considerando velocidade de vento elevada e velocidade de rotação também elevada, pode-se desconsiderar a força devido a rajadas, pois o empuxo já será calculado para o vento máximo.

As forças devido ao giro de direcionamento do rotor para o fluxo, giroscópica e de coriolis<sup>8</sup> foram desconsideradas porque esse movimento normalmente é lento relativo à rotação das pás. A inércia devido à frenagem do sistema também foi desconsiderada devido ao rotor não possuir freio mecânico.

Segundo Gasch e Twele (2002), para grandes turbinas, o peso das pás influencia uma carga cíclica. Para rotores com diâmetro igual a 20m, a influência é pouca; para rotores com diâmetro menor de 5m, essa carga é irrelevante.

As velocidades de vento utilizadas nesta pesquisa são 8, 10, 20, 30 e 40m/s. Existem algumas teorias para escolha da velocidade de vento nominal (de serviço) para aerogeradores, no entanto a experiência tem mostrado que a maioria dos aerogeradores trabalha com velocidade nominal de 10m/s (Habali e Saleh 2000). Apesar de a velocidade do vento variar para cada região, foi delimitada, no presente trabalho, velocidade máxima de 40m/s (equivalente a 144 km/h) para fins de cálculo de cargas aerodinâmicas.

Calculando-se as cargas aerodinâmicas, por exemplo, para uma velocidade de vento de

---

<sup>8</sup> Segundo Roditi (2005), força de coriolis é a força inercial que existe apenas para um observador solidário a um referencial animado de movimento rotacional em relação a um referencial inercial e que parece atuar sobre um corpo em movimento em relação ao referencial girante perpendicularmente a sua velocidade.

10m/s, resolvendo-se as Eq. 10 e 12 tem-se o empuxo com variação cúbica, aumentando ao longo do raio da pá, ou seja, do eixo x do sistema cartesiano do software Abaqus. A força rotacional foi calculada com as Eq. 11 e 13 e entra no sistema com variação quadrática ao longo do mesmo raio da pá.

As cargas aerodinâmicas foram inseridas no *software* Abaqus como um campo de forças, com as magnitudes descritas acima e aplicadas na superfície da pá.

Os valores registrados acima representam cargas calculadas para velocidade de vento de 10m/s. Salienta-se que as simulações realizadas nesta pesquisa apresentam resultados para diversas velocidades de vento. Por esse motivo, para cada velocidade de vento considerada, foi gerado um novo calculo a fim de se obter as cargas aerodinâmicas.

#### 4.3.3. Geração e avaliação da qualidade da malha

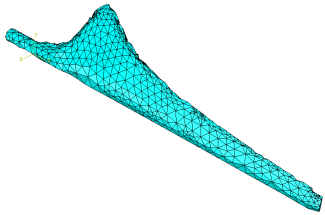
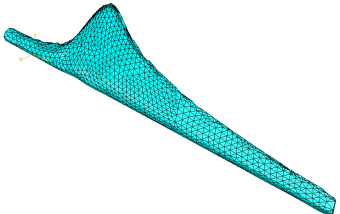
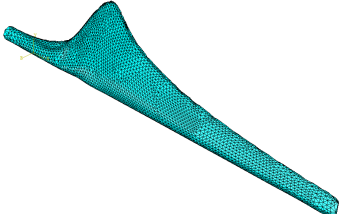
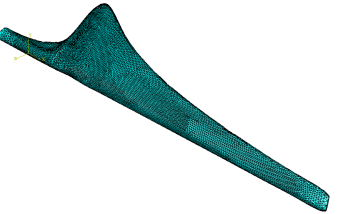
Após a determinação das cargas, torna-se necessário gerar uma malha adequada para o modelo. A geração da malha consiste em uma das principais fases da análise pelo Método dos Elementos Finitos. A geração da malha é quando a geometria é discretizada e representada por elementos finitos. No *software* Abaqus, onde será realizada a simulação, a malha deve ser associada à geometria para incorporar as cargas e condições de contorno. O número de nós e elementos de malha definem o quanto a malha é refinada. Refinamento de malha pode ser conduzido para a simulação apresentar maior compromisso com o comportamento real do objeto.

Um teste de convergência para verificar o refinamento da malha do objeto simulado nesta pesquisa foi realizado. Tanto o teste quanto as simulações posteriores foram realizadas sem linearidade geométrica. Os resultados do teste de validação da malha podem ser observados na tabela 13. A malha foi testada na própria pá modelada anteriormente, com espessura total (duas camadas) 0,007m. O campo de deslocamento em simulação teste, da tabela 13, contém os valores de maior deslocamento na ponta da pá após simulação com carregamento calculado para vento de 40m/s. Esse carregamento foi utilizado nesse momento apenas para teste de refinamento de malha. A diferença notada no deslocamento para cada tamanho global de malha é significativamente pequena para escala do objeto analisado. A maior diferença acontece entre malha com tamanho global 0,1 e malha com tamanho global 0,05. Considerando que a pá

simulada tem comprimento de 1,00m, e a maior diferença ficou na faixa de 0,00032m, é possível afirmar que para análise de deslocamentos na pá, a malha não necessita ser mais refinada do que o tamanho global 0,0125.

O refinamento excessivo de malha no *software* Abaqus pode ser considerado um problema no sentido de aumentar o tempo de processamento computacional, além de, neste caso específico, não incrementar precisão à análise.

Tabela 13 – Dados do teste de validação da malha

Tamanho global da malha	Número de nós	Numero de elementos	Deslocamento em simulação teste (vento 40m/s)	Pá com a malha atribuída
0,1	1056	2108	0,08826m	
0,05	2079	4154	0,08858m	
0,025	4647	9290	0,08838m	
0,0125	13406	26808	0,08855m	



#### 4.3.4. Resultados para deslocamento e tensões

A Figura 35 apresenta a pá modelada por uma malha com tamanho global 0,05, 4154 elementos triangulares de 3 nós, tipo S3 (ABAQUS), formando um total de 2079 nós e mostra resultados de deslocamento para seqüência de laminação com duas camadas,  $[0^\circ, 0^\circ]$ , cada uma com 0,0018 m de espessura e velocidade de vento de 10 m/s, onde o maior deslocamento é verificado na ponta da pá, com magnitude 0,193m.

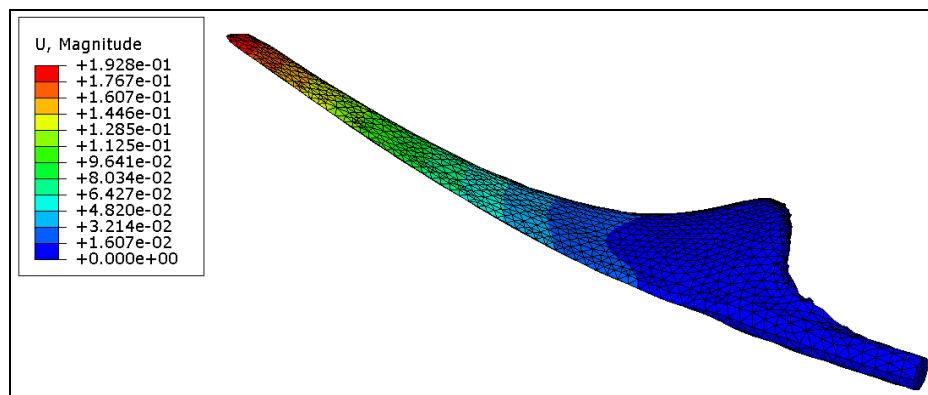


Figura 35: Deslocamento na pá em m

A Figura 36 mostra a distribuição das tensões  $\sigma_{11}$  na pá e comprova que a área mais solicitada está próxima à raiz, ou seja, próximo a parte que é fixada ao eixo.

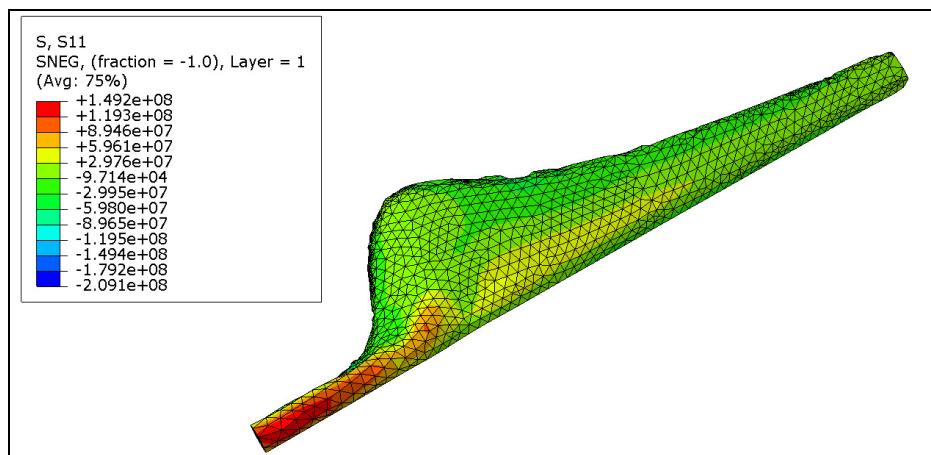


Figura 36: tensões  $\sigma_{11}$  (direção do eixo longitudinal da pá)

Os resultados acima representados por simulações virtuais apresentam uma situação de fabricação e vida útil ideal. Entretanto os materiais compósitos possuem sua resistência máxima, ou resistência de trabalho (propriedades consideradas para cálculos de resistência) reduzida ao longo de sua vida útil.

Além disto, os materiais compósitos apresentam falhas com características mais complexas que os materiais isotrópicos.

#### 4.3.5. Aplicação do critério de falha de Hashin

Objetos fabricados com fibra de vidro normalmente possuem distintas camadas com objetivo de se obter algumas propriedades conforme seu uso. Materiais compósitos constituídos de fibra e matriz estão sujeitos às falhas por delaminação, perda de aderência entre fibras e matriz, ruptura da matriz ou ruptura das fibras.

Existem alguns critérios que descrevem matematicamente em que condições um material compósito pode vir a falhar.

Entre os critérios mais comuns está o de Hashin (1980), que considera os modos de falha de compressão nas fibras, tração ou tensão nas fibras, compressão na matriz e tração ou tensão na matriz do compósito, dados pelas seguintes equações

Modo de tração nas fibras

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_A^2}\right) = 1 \quad (14)$$

Modo de compressão nas fibras

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 = 1 \quad (15)$$

Modo de tração na matriz

$$\frac{1}{Y_t}(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2 + \frac{1}{S_T^2}(\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_A^2}(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (16)$$

Modo de compressão na matriz

$$\frac{1}{Y_c} \left( \frac{Y_c^2}{4S_T^2} - 1 \right) (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{1}{4S_T^2} (\sigma_{22}^2 - \sigma_{33}^2) + \frac{1}{S_T^2} (\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}) + \frac{1}{S_A^2} (\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2) = 1 \quad (17)$$

onde  $\sigma_{ij}$  representam as tensões nos planos conforme figura 31,  $X_t$  é a resistência a tração na direção 1,  $S_A$  é a resistência ao cisalhamento nos planos 1-2 e 1-3,  $X_c$  é a resistência a compressão na direção 1,  $Y_t$  representa a resistência a tração na direção 2,  $S_T$  é a resistência ao cisalhamento no plano 2-3 e  $Y_c$  é a resistência a compressão na direção 2.

As propriedades consideradas para resistência do material, conforme tabela 12, são as seguintes:

- Resistência à tração na direção das fibras = 1020 MPa;
- Resistência à compressão na direção das fibras = 620 MPa;
- Resistência à tração na direção transversal as fibras = 40 MPa;
- Resistência à compressão na direção transversal as fibras = 140 MPa;
- Resistência ao cisalhamento = 60 MPa.

Levando em conta o critério de falhas de Hashin, foram feitas 5 simulações com diferentes espessuras para as camadas do material. O software (Abaqus) aplica as equações para cada modo de falha e dá uma resposta em uma escala numérica designando falha ou não para cada camada do material. Quando a resposta é maior que 1, ocorre falha no material.

A tabela 14 mostra que para duas camadas com espessura 0,0035m cada e velocidade de vento 10m/s, o material teria deslocamento da ordem de 0,0625m. Nesta análise não foram considerados fatores de segurança, pois o objetivo foi levar a simulação ao extremo e observar o limite de falha do material.

Tabela 14 - Dados obtidos nas simulações com diferentes espessuras para velocidade de vento 10m/s

Espessura (m) 2 camadas iguais	Maior deslocamento (m)	Camada	Critério de falha de Hashin			
			Compressão fibra	Tração fibra	Compressão matriz	Tração matriz
0,0036	0,1928	1	0,300	0,064	<b>4,512</b>	<b>9,814</b>
		2	0,316	0,103	0,973	<b>34,880</b>
0,0040	0,1399	1	0,221	0,052	<b>1,040</b>	<b>2,935</b>
		2	0,240	0,080	0,778	<b>11,200</b>
0,0050	0,0968	1	0,127	0,032	0,306	0,997
		2	0,147	0,054	0,459	<b>3,074</b>
0,0060	0,0759	1	0,082	0,020	0,307	0,526
		2	0,103	0,038	0,292	<b>1,361</b>
0,0070	0,0625	1	0,057	0,014	0,327	0,313
		2	0,077	0,029	0,199	0,727

Na tabela 14, segundo o critério de falha de Hashin, não haverá falha por nenhum dos modos para espessuras totais a partir de 0,007m. A figura 37 apresenta a pá modelada com espessura total 0,007m e mostra os valores para o critério de falha de Hashin, na solicitação mais crítica (tração na matriz) para a camada 2.

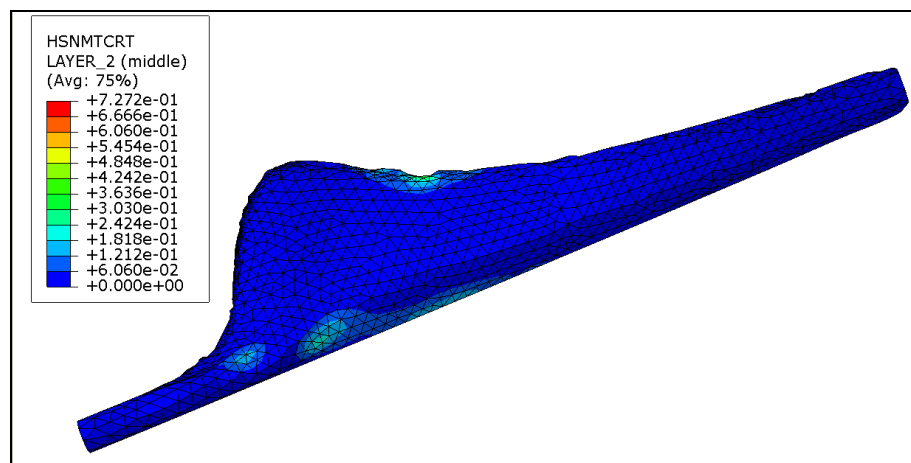


Figura 37: Resultados do critério de falha de Hashin para tração na matriz

Como a pá não apresentou falha na simulação com vento 10m/s e espessura 0,007m, foi testada novamente a pá com a mesma espessura e diferentes velocidades de vento, de 8 a 40m/s. A tabela 15 mostra valores de cargas aerodinâmicas atuantes na pá e os respectivos deslocamentos da ponta da pá para diferentes velocidades de vento.

Tabela 15 - Dados de deslocamento e forças atuantes na pá para diferentes velocidades de vento e espessura de 0,007m

Velocidade vento (m/s)	Maior deslocamento (m)	Força empuxo	Força rotacional
8	0,0619	$36501.93683x^3$	$8111.541520x^2$
10	0,0625	$36860.52841x^3$	$8191.228537x^2$
20	0,0677	$39848.79154x^3$	$8855.287012x^2$
30	0,0763	$44829.23010x^3$	$9962.051136x^2$
40	0,0885	$51801.84408x^3$	$11511.52091x^2$

A tabela 16 apresenta resultados de simulações para pá com espessura total de parede de 0,007m e velocidades de vento de 8 a 40m/s. De acordo com o critério de falha de Hashin, modo de tração na matriz, quando o vento atinge 30m/s ocorre falha na matriz (epóxi) da camada 2 do material.

Tabela 16 - Dados de falha de Hashin para espessura total 0,007m e diferentes velocidades de vento

Velocidade vento (m/s)	Camada	Critério de falha de Hashin			
		Compressão fibra	Tração fibra	Compressão matriz	Tração matriz
8	1	0,0558	0,0135	0,3209	0,3073
	2	0,0761	0,0289	0,1951	0,7104
10	1	0,0569	0,0138	0,3269	0,3134
	2	0,0776	0,0295	0,1997	0,7272
20	1	0,0666	0,0162	0,3790	0,3661
	2	0,0908	0,0345	0,2396	0,8777
30	1	0,0847	0,0205	0,4730	0,4631
	2	0,1150	0,0436	0,3135	1,1730
40	1	0,1137	0,0274	0,6193	0,6176
	2	0,1538	0,0580	0,4321	1,6910

Um processo iterativo de análise, envolvendo variáveis como espessura da peça e cargas atuantes, pode ser implementado a fim de se encontrar o dimensionamento mais adequado para a pá. A tabela 17 mostra diversas espessuras para velocidade de vento de 40m/s (limite considerado nesta pesquisa), considerando o mesmo critério de falha de Hashin.

Tabela 17 – dados de falha de Hashin para velocidade de vento 40m/s

Espessura (m) 2 camadas iguais	Maior deslocamento (m)	Camada	Critério de falha de Hashin			
			Compressão fibra	Tração fibra	Compressão matriz	Tração matriz
0,0070	0,0474	1	0,1098	0,0298	0,2923	1,2830
		2	0,1586	0,0614	0,2323	1,7420
0,0080	0,0407	1	0,0801	0,0214	0,2138	0,8278
		2	0,1254	0,0486	0,1987	1,077
0,0090	0,0356	1	0,0605	0,0158	0,1641	0,5519
		2	0,1024	0,0396	0,1492	0,6922
0,0100	0,0316	1	0,0469	0,0119	0,1308	0,3790
		2	0,0856	0,0330	0,1160	0,4600

Os resultados das simulações conduzidas para a pá apontam para um modelo constituído de duas camadas de fibra de vidro de 0,0045m cada, com as fibras de reforço alinhadas com o eixo longitudinal, laminação  $[0^\circ, 0^\circ]$ , sem estrutura interna de reforço. As pás dimensionadas com essas configurações podem resistir às rajadas de vento da ordem de 40m/s, ou 144km/h. O deslocamento máximo da ponta da pá fica na ordem de 0,035m, ou 3,5% do comprimento da pá. Esse deslocamento mostra-se bastante baixo para uma pá sem reforço interno.

Os resultados mostram também que ao se utilizar um processo de análise estrutural, é possível obter redução no material de fabricação das pás de um rotor eólico de pequeno porte.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A conversão de energia do vento em eletricidade já não é novidade. Existem sistemas funcionando com essa finalidade. No entanto, no Brasil, não existe a cultura da chamada micro-geração.

O projeto de máquinas aerogeradoras utilizadas como fontes de energia não mais alternativas, mas sim em atuação efetiva no suprimento de eletricidade pode ser feito utilizando-se ferramentas computacionais, observando-se os critérios de desenvolvimento de produto.

Para se chegar a um nível considerado excelente, é preciso adequar o projeto dos materiais empregados, dimensionar corretamente as partes e peças que fazem parte do aerogerador, conhecer os fenômenos climáticos das regiões onde o equipamento será instalado, além de outras fases que caracterizam o processo de desenvolvimento de um produto.

Este trabalho de pesquisa apresentou modelagem e simulação computacional da estrutura de uma pá, em fibra de vidro, para aerogerador de pequeno porte, com 1,00m de comprimento. A modelagem 3D levou em conta aspectos aerodinâmicos para potencializar a conversão de energia cinética do vento em energia elétrica. Foram atribuídas cargas devido à ação do vento na pá.

A partir da simulação pelo método dos elementos finitos foi possível propor diferentes espessuras para a parede da pá. Conforme resultados apresentados na tabela 14, fica evidente que quanto menor a espessura da parede da pá, maior é o deslocamento na ponta (com condição de engaste na raiz da pá), com a aplicação da carga.

Os resultados obtidos também mostram que, quando se considerou um critério de falha para o material empregado, nesse caso o critério é o de Hashin e o material é fibra de vidro com matriz epóxi, nota-se que os modos de falha na matriz tendem a serem os modos de falha dominantes. Não ocorreram, para as espessuras e velocidades testadas, falhas na direção das fibras.

As simulações levaram em conta o deslocamento, principalmente na ponta da pá, que ocorre após aplicação da carga de serviço. Esse deslocamento deve ter pequena magnitude, pois existe possibilidade de colisão com a torre ou haste de suporte do aerogerador.

Para as simulações aproximarem-se da realidade, deverão ser feitos levantamentos de dados de vento da região onde se pretende instalar o aerogerador.

Os dados obtidos a partir deste estudo podem auxiliar no desenvolvimento do projeto das pás de aerogeradores de pequeno porte. As simulações virtuais de estruturas, assim como

simulações de perfis aerodinâmicos feitas por computador, tornaram-se ferramentas bastante importantes quando se pretende projetar equipamentos aerodinâmicos.

### 5.1. Sugestões para futuros trabalhos

A complexidade do tema abordado neste trabalho expõe grande perspectiva de continuidade de pesquisa científica na área das energias.

Destaca-se que a atual fase de pesquisa e desenvolvimento em energia eólica encontra-se em uma curva ascendente. Pode-se dizer que os desafios atuais estão, principalmente, na redução de custo de fabricação dos equipamentos de conversão de energia.

A pesquisa aqui apresentada não representa o fim de um ciclo investigatório. A partir desta constatação, pode-se destacar como sugestões para futuras pesquisas aplicação de materiais alternativos à fibra de vidro para fabricação das pás de aerogeradores de pequeno porte. Sugere-se também estudo de localização para instalação do sistema em residências, condomínios ou edifícios comerciais e residenciais. Ainda como sugestão de atividade projetual dentro de futuras pesquisas pode-se citar a criação de modelos de turbinas do tipo TEEV (de eixo vertical), também em ambiente computacional para realização de simulação estrutural com intuito de maximizar a potência e reduzir materiais e custos.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J. L. **Fontes de Energia**. Brasília/DF: Editora Universidade de Brasília, 1994.

ALÉ, J. V.; LOPES, H. F.; WENZEL, G. M. **Aproveitamento de sistemas eólicos em áreas urbanas: estudo do caso de Porto Alegre**. In: SEMESAM - Seminário de Meio Ambiente – USFC, 2006, Santa Catarina.

ALÉ, J. V.; LOPES, H. F.; WENZEL, G. M. **Estudo da implementação de sistema eólico em prédio da empresa Auxiliadora Predial**. In: IV CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2006, Recife.

ANTUNES, M. **Tecnologia Eólica para Produção de Energia Elétrica**. In: 2º Simpósio da Área de Electrónica de Potência, Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho. 2005, Portugal.

APPIO, A. J. **Energia Eólica – Evolução e Perspectiva no Brasil**. Disponível em <http://www.appio.org/energiaEolica.htm>. Acessado em 15 de fevereiro de 2009.

BARBERO, E. J. **Introduction to Composite Materials Design**. Taylor and Francis, Philadelphia, PA, 1998.

BRASIL, Agencia Nacional de Energia Elétrica. **Resolução nº112 de 18 de maio de 1999**. Estabelece os requisitos necessários à obtenção de Registro ou Autorização para a implantação, ampliação ou repotenciação de centrais geradoras termelétricas, eólicas e de outras fontes alternativas de energia. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em outubro de 2010.

BURATTINI, M. P. T. de C. **Energia: uma abordagem multidisciplinar**. São Paulo: Editora Livraria de Física, 2008.

BURTON, T.; SHARPE, D.; JENKINS, N.; BOSSANYI, E. **Wind energy: handbook**. England: Ed. John Wiley & sons, 2001.

CAMARGO, O. A. **Atlas Eólico: Rio Grande do Sul**. Porto Alegre/RS: Secretaria de Energia Minas e Comunicações – SEMC, 2002.

CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza/CE: Imprensa Universitária, 2003.

CBEE - **Centro Brasileiro de Energia Eólica**. [www.eolica.org.br/](http://www.eolica.org.br/). Acessado em 24 de fevereiro de 2009.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica. **Simulador de Consumo**. Disponível em [www.cee.com.br](http://www.cee.com.br). Acessado em 01 de outubro de 2010.

CRESESB – **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito**. [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br). Acessado em 24 de fevereiro de 2009.

DALMAZ, A. **Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina**. Florianópolis/SC, 175 p., 2007. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.

FIGUEIREDO, J. A. G.; GAMBOA, P. V., SILVESTRE, M. A. **Novo Conceito de Turbina Eólica**. Conferência Engenharia'2003 Inovação e Desenvolvimento. 2003, Covilhã, Portugal.

FINK, D. G. **Manual práctico de Electricidad para Ingenieros**. Espanha: Ed. Reverte, 1984

GASCH, R.; TWELE, J. **Wind Power Plants**. Germania: Ed. Solarpraxis AG, 2002.

GUIPE, P. **Wind Energy Basic: a guide to small and micro Wind systems**. Vermont Totnes, Inglaterra: Chelsea Green Publishing Company, 1999.

GWEC – Global Wind Energy Council. **Global Wind 2009 Report**. Belgica: Ed. Angelika P., Liming Q. e Steve S., 2010.

HABALI, S. M.; SALEH, I. A. **Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root**. Energy Conversion & Management, p. 249-280, 2000

HANSEN, M. O. L. **Aerodynamics of Wind Turbines**. United Kingdom: Ed. Earthscan, 2000.

HASHIN, Z. **Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites**. Journal of Applied Mechanics, v.47, p.329-334, 1980.

HAU, E. **Wind turbines: fundamentals, technologies, applications, economics**. Alemanha: Ed. Birkhäuser, 2006.

HEPPERLE, M. **Other Airfoils – MH110, free profile**. [www.mh-aerotools.de](http://www.mh-aerotools.de). 2004.

HEPPERLE, M. **JavaFoil - free software**. [www.mh-aerotools.de](http://www.mh-aerotools.de). 2004.

IGNÁCIO, E. **Fontes Alternativas de Energia**. Núcleo José Reis de divulgação científica – ECA/USP. 2007, ano 7, n° 39. São Paulo/SP.

JURECZKO, M. *et al*, **Optimization of Wind Turbine Blade**. Journal of Materials Processing Technology, p. 463-471, 2005

KAMINSKI, C. P. **Desenvolvendo produtos com planejamento, criatividade e qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

KRAUTER, S. **Usos da Energia Eólica**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LAYTON, J. **Como funciona a energia eólica.** <http://ambiente.hsw.uol.com.br/energia-eolica1.htm>. Acessado em 24 de fevereiro de 2009.

LISSAMAN, P. B. S. **Wind Turbine Technology.** New York, USA: David A. Spera Editor, 1998.

MACHADO, I. R. **Sistema eólico para carregamento de baterias.** Fortaleza/CE, 162 p., 2007. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará.

MARQUES, J. **Turbinas Eólicas: modelos, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação.** Santa Maria/RS, 132 p., 2004. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

MARSCHOFF, C. M. **Las fuentes de energía en el siglo XXI.** Buenos Aires, Argentina: Fondo de Cultura Económica de Argentina S.A., 1992.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física. V.30, Artigo nº 1304, 2008.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science.** Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing, 1999.

McMULLAN, J.T.; MORGAN, R.; MURRIA, R.B. **Recursos Energéticos.** Barcelona, Espanha: Blume, 1981.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

OLIVEIRA, B. F. **Mecânica dos sólidos III.** Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Notas de aula, 2003.

OLIVEIRA, B. F., CREUS, G.J. **Viscoelastic failure analysis of composite plates and shells.** Composite Structures, 2000; 49:369-384.

ORNELLAS, A. J. **A energia dos tempos antigos aos dias atuais.** Maceió/AL: EDUFAL, 2006.

OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibra de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** Curitiba/PR, 106 p., 2004. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná.

PATEL, M. R. **Wind and Solar Power Systems.** New York, USA: U.S. Merchant Marine Academy, 1999.

PETRY, A. P. **Análise numérica de escoamentos turbulentos tridimensionais empregando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas.** Porto Alegre/RS, 149 p., 2002. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RODITI, I. **Dicionário Houaiss de Física.** Rio de Janeiro: Objetiva, 2005.

ROSIM, S. O. **Geração de energia elétrica – Um enfoque histórico e institucional das questões comerciais no Brasil.** São Paulo/SP, 153 p., 2007. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo.

SHOKRIEH, M. M.; RAFIEE, R. **Simulation of fatigue failure in a full composite wind turbine blade.** Composite Structures, p. 332-342, 2006.

SIMULIA, DASSAULT SYSTEMES. **ABAQUS/CAE Version 6.5 User's Guide.** Providence, RI, USA, 2006.

STANKOVIC, S.; CAMPBELL, N.; HARRIES, A. **Urban Wind Energy.** Reino Unido: Earthscan, 2009.

STEADMAN, P. **Energía, medio ambiente y edificación.** Madrid: Herman Blume Ediciones, 1978.

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciencia, 2003.