



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

JOSÉ HELDENIR PINHEIRO BEZERRA

**MODELAGEM DE PERFIL AERODINÂMICO DE PÁS EÓLICAS DE FIBRA
VEGETAL PARA AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE**

FORTALEZA

2014

JOSÉ HELDENIR PINHEIRO BEZERRA

**MODELAGEM DE PERFIL AERODINÂMICO DE PÁS EÓLICAS DE FIBRA
VEGETAL PARA AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título Grau de Mestre em Máquinas e Mecanização Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Albiero.

FORTALEZA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- B469m Bezerra, José Heldenir Pinheiro.
Modelagem de perfil aerodinâmico de pás eólicas de fibra vegetal para aerogerador de pequeno porte / José Heldenir Pinheiro Bezerra. – 2014.
67 f. : il.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2014.
Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.
Orientação: Prof. Dr. Daniel Albiero.
1. Energia eólica. 2. Aerogeradores. 3. Pás de turbina. I. Título.

JOSÉ HELDENIR PINHEIRO BEZERRA

**MODELAGEM DE PERFIL AERODINÂMICO DE PÁS EÓLICAS DE FIBRA
VEGETAL PARA AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do título Grau de Mestre em Máquinas e Mecanização Agrícola. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.

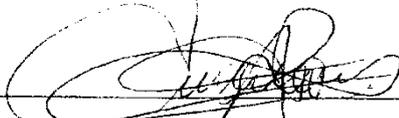
Orientador: Prof. Dr. Daniel Albiero.

Aprovada em: 30/Julho/2014.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Daniel Albiero (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



Prof. Dr. Luiz Antônio Rossi
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Prof. Dr. Willys Machado Aguiar
Instituto Federal de Ciências, Educação e Tecnologia do Ceará (IFCE)



Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus

Aos meus pais, Antônio Helder Bezerra Pinto,
em memória Maria Adenice Pinheiro Bezerra.

As minhas filhas Viviane da Costa Bezerra e
Vanessa da Costa Bezerra.

Aos meus irmãos Francisco Helber Pinheiro
Bezerra e Carlos Hederane Pinheiro Bezerra.

Aos meus professores.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal do Ceará e ao Instituto Federal do Ceará, pelo apoio a minha formação.

Ao Prof. Dr. Daniel Albiero, pela oportunidade e orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Willys Machado Aguiar, Prof. Luiz Antônio Rossi e Prof. Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores que dedicaram seus esforços e energia ao ensino.

Aos colegas da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

“A paciência manifesta-se extraordinária de dois modos: quando alguém suporta grandes males pacientemente ou quando suporta aquilo que poderia ter evitado e não quis evitar.”

Texto Cristão

RESUMO

A geração de energia eólica-elétrica no interior do Ceará não representa um percentual significativo na geração de energia do Estado. Apesar de possuir ventos favoráveis durante o ano inteiro, a utilização de aerogeradores comerciais de pequeno porte não é uma prática local. As possíveis causas do baixo índice são: as poucas pesquisas voltadas para desenvolvimento de equipamentos compatível com baixos ventos e de baixo custo, a ausência de empresas brasileiras que ofereçam geradores eólicos, o uso de equipamentos importados e com aplicações para ventos e condições climáticas diferenciadas do interior cearense – acarretando baixo rendimento -, os problemas de manutenção, os erros nas operações de segurança e as dificuldades de reparo. Para desenvolver esse trabalho foram utilizados máquinas, ferramentas e softwares como SolidEdge versão ST6, Computer-aided design (CAD) NX4 no desenho e comunicação com centro de usinagem vertical, ferramentas em geral, equipamentos para pinturas e aplicação de resinas, bomba de vácuo, instrumentos de medição de volume (béquer, proveta etc.), balança de precisão e pipetas. A técnica utilizada na fabricação das pás foi à infusão a vácuo, processo relativamente simples e com a vantagem de reduzir a emissão volátil com uso de moldes fechados. A escolha do perfil e-61 para modelar foi obtido por meio de dados do software JavaFoil e FoilSimIII, indicando o perfil escolhido com um bom coeficiente de sustentação aerodinâmico. A fibra de carnaúba foi utilizada como reforço no compósito para produção das pás com diferentes resinas, o que possibilita o uso de mão de obra e matéria prima local na construção de pás eólicas reforçada com fibras vegetais de carnaúba e resinas poliéster.

Palavras-chave: Energia eólica. Energia na agricultura. Fibras vegetais Brasileiras. Aerogerador de pequeno porte.

ABSTRACT

Power generation wind-power in cities of Ceará don't represent a significant percentage of the power generation in the state. Although Ceará has favorable winds to use a small commercial wind's turbines, this isn't a practice that belongs to these cities. Possible causes of the low rate might be: few researches for development of compatible equipment with low winds and low cost, the fact that Brazilian companies doesn't offer wind generators appropriate for the area, most of the equipment used in the country is imported and often applied for type of winds and climate conditions different of the Ceará's - which puts the equipments in its low perform- , repair difficulties and problems with the security operations (guide). For development of this work was used machines, tools and software such as SolidEdge version ST6, Computer-aided design (CAD) NX4 in the design and communication with vertical machining center, general tools, equipment for painting and application of resins, vacuum pump, measuring instruments volume (beaker, measuring cylinder etc.), analytical balance and pipettes. The technique used for the manufacture of the blades was vacuum infusion, relatively simple procedure and has the advantage to reduce volatile emissions with the use of closed molds. The selection of the profile e-61 was obtained by data from the software FoilSimIII and JavaFoil, which indicates the good chosen for lift aerodynamic coefficient. The carnauba fiber was used as reinforcement in composite to produce the blades with different resins, which makes it possible the use of manpower and local level raw materials to the construction of wind blades, being reinforced with vegetable carnauba fibers and polyester resins.

Keywords: Wind energy. Agriculture energy. Natural fibers. small wind turbine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar	18
Figura 2	- Fluxo de ar por meio de uma área transversal A.....	20
Figura 3	- Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás	21
Figura 4	- Distribuição de (cp) em função de (v_3/v_1).....	23
Figura 5	- Movimentação de duas superfícies separadas por um fluido	24
Figura 6	- Esquema de fluxo laminar	26
Figura 7	- Esquema de fluxo turbulento.....	26
Figura 8	- Exemplos de turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical.....	27
Figura 9	- Principais forças atuantes em pá de turbina eólica.....	29
Figura 10	- Curva polar de determinado perfil.....	29
Figura 11	- Distribuição de forças aerodinâmicas em um perfil de pá naca 0012 com ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$	30
Figura 12	- Esquema das forças aerodinâmicas e resultantes das forças que giram a pá	30
Figura 13	- Soma das forças resultantes ao longo da pá	31
Figura 14	- Método de cálculo de um elemento da lâmina, para o fator de indução axial.....	33
Figura 15	- Esquema de classificação para vários tipos de compósitos.....	35
Figura 16	- Constituição estrutural de uma fibra vegetal.....	38
Figura 17	- Sustentação (L) e arrasto (D) em função do coeficiente de potência e velocidade específica.....	44
Figura 18	- Forma do perfil aerodinâmico Epller61	44
Figura 19	- Corda das seções ao longo da pá.....	47
Figura 20	- Ângulo de torção ao longo da pá.....	47
Figura 21	- Forças e velocidade do vento na pá.....	48
Figura 22	- Desenho da pá no SolidEdge st6	49
Figura 23	- Desenho do molde para injeção da resina	49
Figura 24	- DISCOVERY 1000 centro de usinagem vertical	50
Figura 25	- Fresa ball para acabamento da superfície do molde.....	50
Figura 26	- Molde preparado para injeção	51

Figura 27	- Tecidos sem costura, denominados de (a) Plain Weave, (b) Satin Weave e (c) Twill Weave	54
Figura 28	- Trama da palha da carnaúba Plain Weave.....	55
Figura 29	- Espessura da trama da palha da carnaúba Plain Weave	55
Figura 30	- Modelamento da palha no molde de infusão.....	56
Figura 31	- Processo de infusão da resina.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Aerogeradores de pequeno porte	17
Tabela 2	- Sugestão do número lâminas, B, por diferentes tipos de velocidade de ponta	33
Tabela 3	- Torção e corda distribuídas com rendimento (betz), lâmina ideal; r/R , fração do raio e rotor; c/R , corda	34
Tabela 4	- Quantidade e valor dos produtos da extração vegetal, por produtos, segundo as grandes regiões e as unidades da federação – 2009	37
Tabela 5	- Composição química da fibra da folha de carnaúba.....	37
Tabela 6	- Dados técnicos do Aerogerador	42
Tabela 7	- Distribuição do twist ψ e corda ao longo da pá	46
Tabela 8	- Vento relativo ao longo das seções da pá.....	48
Tabela 9	- Resultados do perfil E61 aplicado na pá.	58
Tabela 10	- Dados de entrada com velocidade do vento de $3.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	59
Tabela 11	- Forças de Sustentação e arrasto obtidas pelo Software FoilSimIII	59
Tabela 12	- Norma de segurança IEC 61400-2	60
Tabela 13	- Classe de ventos de aerogeradores	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	Aerogeradores de pequeno porte	16
2.2	Teoria da geração de energia eólica	17
2.2.1	<i>Ventos predominantes da atmosfera</i>	17
2.2.2	<i>Potência retirada do vento</i>	19
2.2.3	<i>Concepção do disco atuador</i>	23
2.2.3.1	<i>Arraste e efeito da fricção interna do fluido</i>	23
2.2.3.2	<i>Efeito Reynolds</i>	24
2.2.4	<i>Fluxo na turbina eólica</i>	27
2.2.4.1	<i>Turbinas de eixo vertical</i>	27
2.2.4.2	<i>Turbinas de eixo horizontal</i>	28
2.2.4.3	<i>Forças aerodinâmicas nas pás</i>	28
2.3	Concepção do disco atuador	32
2.3.1	<i>Elementos das pás</i>	32
2.3.2	<i>Materiais compósitos</i>	34
2.3.3	<i>Fibras da carnaúba</i>	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Materiais	39
3.1.1	<i>Local do desenvolvimento do trabalho</i>	39
3.1.2	<i>Material utilizado para produção da pá</i>	39
3.1.2.1	<i>Propriedades mecânicas dos materiais</i>	40
3.2	Métodos.....	41
3.2.1	<i>Escolha do rotor eólico</i>	41
3.2.2	<i>Parâmetros do rotor para condições específicas</i>	42
3.2.2.1	<i>Velocidade específica da pá (Tip Speed Ratio)</i>	42
3.2.2.2	<i>Definição do perfil da pá</i>	43
3.2.2.3	<i>Potência do rotor com CP (BETZ)</i>	45
3.2.2.4	<i>Geometria longitudinal da pá</i>	45

4	RESULTADOS	48
4.1	Forças aerodinâmicas na pá	48
4.1.1	<i>Desenho da pá e molde de injeção</i>	48
4.1.2	<i>Usinagem dos moldes inferior e superior</i>	50
4.1.3	<i>Matrizes poliméricas</i>	51
4.1.3.1	<i>Resinas aplicadas nas pás</i>	52
4.1.3.2	<i>Pá de resina poliéster</i>	52
4.1.3.3	<i>Pá de resina vinil éster</i>	53
4.1.3.4	<i>Fibras utilizadas em compósitos</i>	53
4.1.4	<i>Processo de produção da pá</i>	56
4.2	<i>Forças aerodinâmicas na pá</i>	58
4.2.1	<i>Uso de software para obter as forças normal e tangencial da pá</i>	58
4.3	<i>Produção de pás com reforço</i>	61
5	DICUSSÃO DOS RESULTADOS	62
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos assuntos mais importantes para as discussões sobre o futuro da humanidade. Sua existência é tão relevante que torna a produção de energia uma área estratégica para as nações que compõem o mundo. Com isso, tópicos como sustentabilidade e como os impactos ao meio ambiente tornam-se cada vez mais comuns em nosso cotidiano, e, ao mesmo tempo em que ocorre esse despertar, há a busca para ampliação da oferta e para a redução de custos.

O estado do Ceará, em conjuntura com a Secretaria Estadual da Infraestrutura, têm se destacado pela visão de longo prazo, buscando o aproveitamento do imenso potencial eólico para sanar o déficit do sistema elétrico estadual, sendo visto com pouca geração e situado na ponta do sistema interligado de transmissão elétrica. A diretriz de longo prazo é a auto sustentabilidade pelo uso de recursos naturais estaduais.

Apesar de possuir regime regular de ventos, a utilização de aerogeradores comerciais de pequeno porte fica inviabilizada pela baixa velocidade dos ventos e alto custo para aquisição. Segundo Jureczko et al (2005), o custo de fabricação das pás de uma turbina eólica chega a ser de 15 a 20% mais em conta do que custo total de produção da turbina. Este fato justifica a realização de pesquisa científica com objetivos de reduzir custos de equipamentos, agregando segurança, e maximizar a eficiência em conversão de energia.

A escolha de um material para aplicação nas pás eólica depende, além das propriedades físicas e mecânicas, do aspecto da vida útil do material, pois a degradação de suas propriedades afeta o seu desempenho, bem como o fator econômico, considerando o custo final do produto.

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. À medida que se tornam mais finos, os materiais tendem a apresentar menor número de defeitos que venham possivelmente a induzir as falhas e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material, representada pela resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos.

A carnaubeira (*Copernicia prunifera*) é uma espécie de palmeira nativa do Brasil com altura que varia entre 7 e 10 metros, podendo atingir os 15 metros. A planta possui um tronco reto e cilíndrico com diâmetro entre 15 e 25 centímetros. Geralmente ocorre nos pontos mais próximos dos rios, predominantemente em solos argilosos (pesados), aluviais (de margens de rios) e com a capacidade de suportar alagamento prolongado durante a época de

chuvas, elevada capacidade de adaptação ao calor suportando 3.000 horas de insolação por ano, além de ser bastante resistente a elevados teores de salinidade. Essa palmeira ocorre no Nordeste Brasileiro, nos vales dos rios da região da caatinga, principalmente do Parnaíba e seus afluentes, do Jaguaribe, do Acaraú, do Apodi e do médio São Francisco. Também pode ser encontrada nos Estados do Pará, Tocantins, Maranhão e Goiás.

Segundo dados do IBGE, o Ceará destaca-se com 98,2% da produção de fibras de Carnaúba do Brasil, esse fato já justifica a realização da pesquisa científica com esse material, tendo como objetivos a redução de custos das pás dos equipamentos eólicos, a utilização de critérios de segurança normatizados e a ideia de maximizar a eficiência em conversão de energia.

1.1 Objetivo Geral

Construir pás eólicas com reforço de fibras vegetais de carnaúba e resinas poliéster para equipar Aerogeradores comerciais utilizando perfil da pá Eppler61 projetado para baixa velocidade de vento médio anual de 6 ($m.s^{-1}$) Classe IV IEC61400-2.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar modelagem geométrica em três dimensões (3D), aplicando conceitos de aerodinâmica para perfis de pás de turbina eólica, observando a máxima potência que pode ser extraída do vento médio anual do Ceará.

Viabilidade técnica e econômica do uso das fibras de carnaúba nos compósitos aplicado na construção das pás.

Calcular das forças aerodinâmicas que atuam na pá realizando análise com simulação de software com velocidade de ventos média anual do Ceará e sua classificação na norma IEC.

Identificar nas Classes de vento I a IV da norma IEC61400-2 qual o fator de segurança aerodinâmico para velocidade de ventos médio anual do Ceará.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aerogeradores de pequeno porte

A turbina eólica é definida como pequeno porte quando sua capacidade nominal é igual ou inferior a 100 kW, essas turbinas se enquadram na faixa de menor potência a partir de 1 kW aplicada fora da rede elétrica e turbinas de 100 kW para fornecer energia elétrica a uma pequena vila. Cinquenta e quatro pequenos modelos de turbinas são oferecidos comercialmente nos Estados Unidos para aplicações, incluindo casas, escolas, instalações comerciais e industriais, telecomunicações, sítios e fazendas e comunidades.

Até o final de 2012, mais de 150 mil pequenas turbinas eólicas foram instaladas nos Estados Unidos. Hoje, os fabricantes norte-americanos respondem por mais de 70 por cento do mercado das pequenas turbinas de USA (AWEA, 2014). As aplicações são variadas, a depender das necessidades, especialmente em áreas remotas, em que eles são utilizados principalmente para bombear água e geração de energia elétrica.

Uma equipe do Instituto Politécnico Worcester nos Estados Unidos desenvolveu um sistema energético de pipas cuja produção de eletricidade estimada é de aproximadamente 1 kW. Este sistema utiliza uma pipa planadora para induzir o movimento em uma viga pivotal (BREUKELS, 2006).

Em agosto de 2011 a companhia alemã SkySails, produtora de pipas para a propulsão de navios, anunciou um sistema de energia eólica baseado em pipas para aplicações na terra ou no mar, o qual deve ser "30% mais barato que as instalações marítimas atuais. (BRABECK, 2010).

Em um passado recente, os aerogeradores de pequeno porte disponíveis apresentavam muitos defeitos, tais como desempenho aquém do esperado, problemas de resistência, vibração, pás e torres facilmente avariadas. Para melhorar o índice de qualidade, a Germanischer Lloyd definiu regras de certificação. O sistema Germanischer Lloyd adota a mesma classificação de turbinas eólicas que a IEC 61400-1, que conforme norma internacional para geradores de pequeno porte, a IEC-NORM 61400-2, 2006 – Design Requirements for Small Wind Turbines os geradores de pequeno porte são definidos pelos rotores com área varrida de até 200m², que geram uma média de 350W/m², isso significa uma potência máxima de 70kW e nesse caso, as torres são limitadas em 20m.

A maioria dos aerogeradores de pequeno porte oferecidos atualmente no mercado tem potências entre 5 e 10kW (IEC-NORM 61400-2:2006; POLLICINO, 2010; SUN & WIND ENERGY 1, 2010). Na Tabela 2, constam vários tipos de aerogeradores de pequeno porte, com suas respectivas potências e diâmetros do rotor.

Tabela 1- Aerogeradores de pequeno porte

Equipamentos	Potência [KW]	Diâmetro [m]
Air	0,4	1,15
AIRCON 10S	9,8	7,13
Alize	10	7
Antaris	3,6	3,5
BWC Excel	10	7
Easy Wind 6 AC	1,5/6,0	6
Easy Wind 6 DC	7,5	6
EW Elisa	2,5	3,6
HEOS H50	50	12
INCLIN 6000 neo	5,6	5
Montana	5,6	5

Fonte: (BUNDESVERBAND WINDENERGIE, 2010).

2.2 Teorias da geração da energia eólica

2.2.1 Ventos predominantes da atmosfera

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isso porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos (CRESESB, 2012).

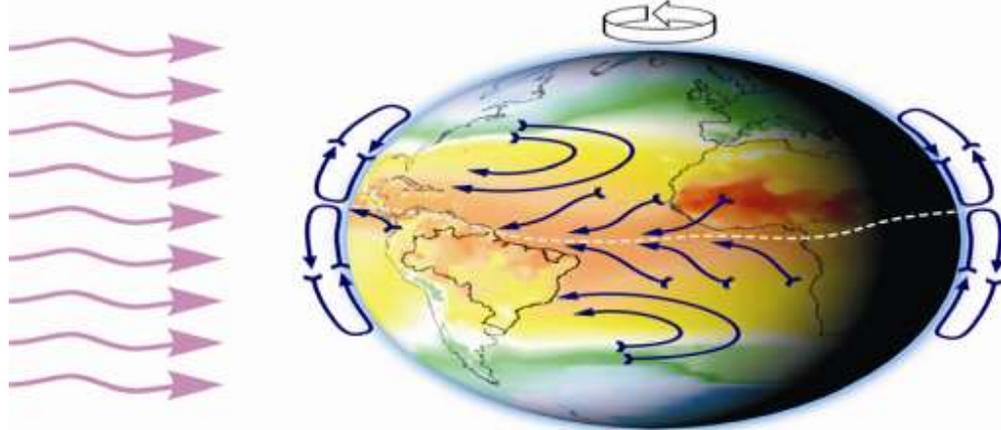
Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem - aquecimento no equador e resfriamento nos pólos - estão sempre presentes na natureza. Os ventos polares são chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em ventos globais:

a) Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes;

- b) Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes;
- c) Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos;
- d) Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

A Figura 1 representa esse mecanismo:

Figura 1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar



Fonte: (CEPEL, 2001).

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultados, surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas. As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol inerentes a cada tipo de superfície (tais como mares e continentes) surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima, encontram-se os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é invertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales (CRESESB, 2012).

2.2.2 *Potência retirada do vento*

A energia cinética de uma massa de ar (m) com uma velocidade (v) é dada por:

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

E = energia cinética [$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$]

ρ = massa específica do ar [$kg \cdot m^{-3}$]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$]

Considerando a mesma massa de ar (m) em movimento a uma velocidade (v), perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (figura 2), pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção (A), transversal ao fluxo de ar, é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

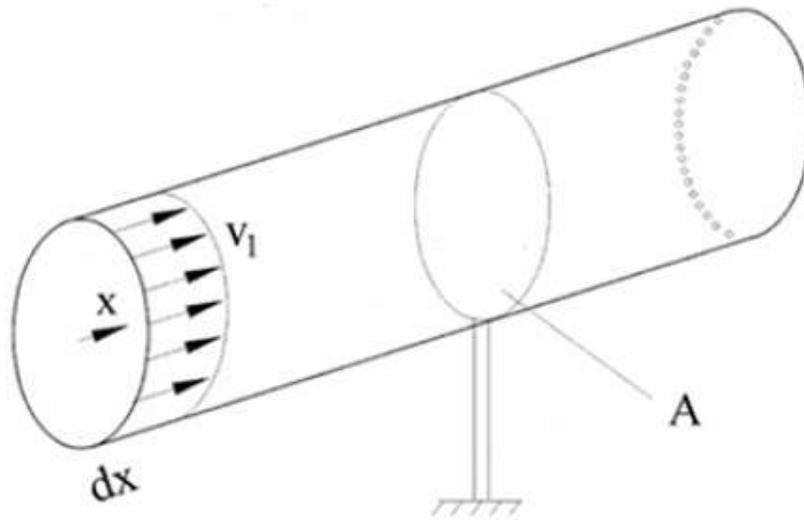
P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [$kg \cdot m^{-3}$]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$]

Figura 2 - Fluxo de ar através de uma área transversal



Fonte: (CRESESB, 2001).

A equação 2 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência (DP), ou fluxo de potência:

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

DP = fluxo de potência do ar [w]

ρ = massa específica do ar [$Kg \cdot m^{-3}$]

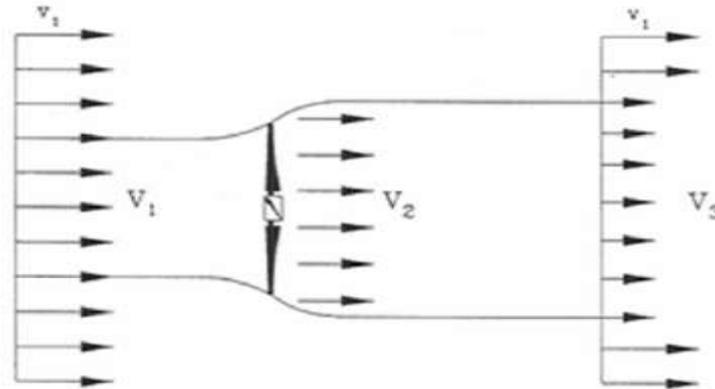
A = área da seção transversal [m^2]

V = velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$]

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica por meio da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência (c_p), que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do motor.

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (c_p máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde (v_1) representa a velocidade do vento na região anterior às pás, (v_2) a velocidade do vento no nível das pás e (v_3) a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás



Fonte: CRESESB, (2001).

Como na figura 4, Albert Betz assume que um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade (v_1) que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade (v_3) a jusante das pás. Pela lei da continuidade, obtemos que:

$$\rho V_1 A_1 = \rho V_2 A_2 = \rho V_3 A_3 \quad (4)$$

ρ = massa específica do ar [$Kg \cdot m^{-3}$]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$]

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante. A energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_3^2) \quad (5)$$

E_{ex} = energia extraída do vento [$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$]

ρ = massa específica do ar [$Kg \cdot m^{-3}$]

A = área da seção transversal [m^2]

v_1 = velocidade do vento a montante [$m \cdot s^{-1}$]

v_3 = velocidade do vento a jusante [$m \cdot s^{-1}$]

A potência extraída do vento por sua vez é dada por:

$$\dot{E}_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \dot{m}(V_1^2 - V_3^2) \quad (6)$$

A velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre (v_1) e (v_3) que pode ser calculado se a velocidade no rotor (v_2) é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (7)$$

\dot{m} = massa de ar [$kg \cdot s^{-1}$]

ρ = massa específica do ar [$Kg \cdot m^{-3}$]

A = área da seção transversal [m^2]

v_2 = velocidade do vento no rotor [$m \cdot s^{-1}$]

Pelo teorema de Rankine-Froude, pode-se assumir que a relação entre as velocidades (v_1), (v_2) e (v_3) é dada por:

$$V_2 = (V_1 + V_3)/2 \quad (8)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 7 e a velocidade (v_2) apresentada na equação 8 forem inseridas na equação 6, resulta em:

$$\dot{E}_{\text{ex}} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

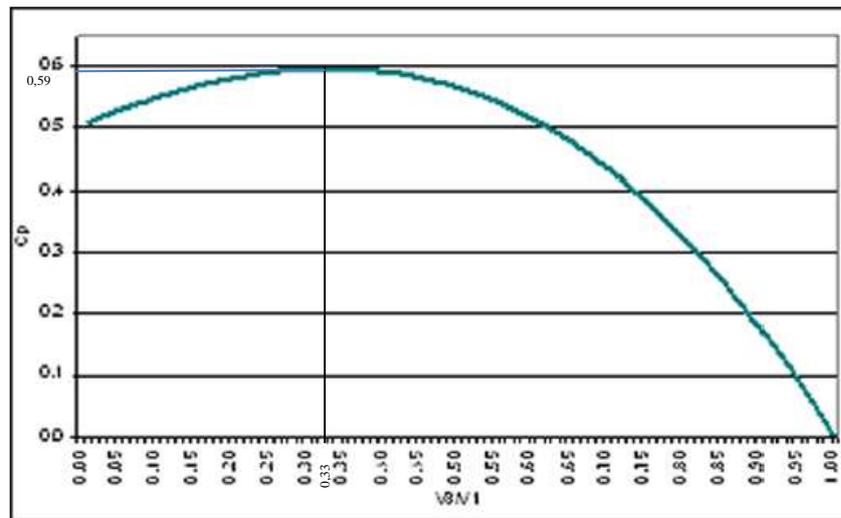
Onde:

$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho A V_1^3$$

$$\text{Coeficiente de Potência } c_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \right\}$$

C_p máximo demonstrado na Figura 4.

Figura 4 – Distribuição de (c_p) em função de (v_3/v_1)



Fonte: Adaptada do Manwell, (2009).

Ao considerar o coeficiente de potência (c_p) em função de $(v_3)/(v_1)$ temos que:

$$Cp_{Betz} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (10)$$

Onde $(v_3)/(v_1)=1/3$.

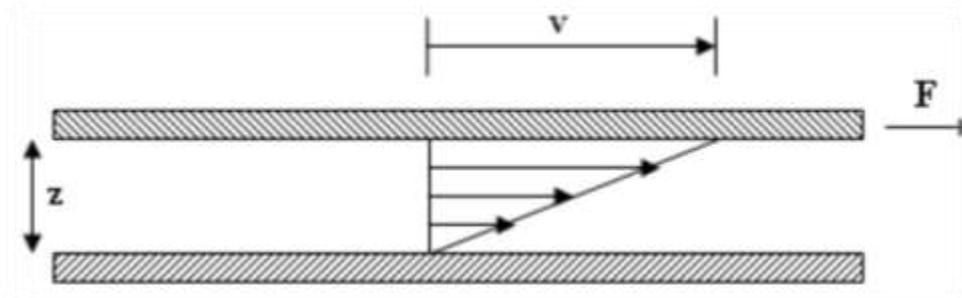
Desse modo, comparando à situação das correntes de ar bem anterior e bem posterior a passagem pelo disco do rotor, não há mudança na pressão estática, mas há significativa redução na energia cinética na corrente posterior. (BURTON, 2008).

2.2.3 *Concepção do disco atuador*

2.2.3.1 *Arraste e efeito da fricção interna do fluido*

Segundo Munson et al, (2004) “a pressão de um fluido incompressível é igualmente transmitida em todas as suas direções, isto não se aplicando ao Ar”. Para movimentar um fluido em relação a uma superfície, é necessário empregar uma força para compensar a fricção interna do mesmo, iniciando uma movimentação relativa entre as duas superfícies separadas por um fluido (Figura 5), assim forma-se um perfil de velocidade linear.

Figura 5 – Movimentação de duas superfícies separadas por um fluido



Fonte: (MUNSON, 2004).

$$F = \eta A \left(\frac{v}{z} \right) \quad (11)$$

onde:

F = força sobre uma camada de fluido [N]

η = viscosidade dinâmica do fluido [$N.s.m^{-2}$]

A = área da superfície [m^2]

z = distância [m]

v = velocidade [$m.s^{-1}$]

A viscosidade de um gás é produzida predominantemente pela transferência da quantidade de movimento entre camadas adjacentes que se movem com velocidades diferentes. Com o aumento da temperatura, a velocidade média das partículas também aumenta o que torna, neste caso, a transmissão de energia mais difícil. A fricção interna do fluido define o tipo de escoamento: o fluxo turbulento apresenta mais fricção interna que um do tipo laminar. Analisando pela teoria de Reynolds, as duas formas são distinguíveis (GERTHSEN e VOGEL, 1993).

2.2.3.2 *Efeito Reynolds*

Inicialmente, é necessário trazer em foco o que constitui o Efeito Reynolds. Seria, não menos que, o coeficiente, número ou módulo de Reynolds (abreviado como Re), que resulta em um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. O seu significado físico é um

quociente de forças de inércia (ρv) entre forças de viscosidade ($\frac{\mu}{D}$) e é expresso logo a seguir pela equação 12 (ROTT, 1990).

$$\text{Re} = \frac{\rho \ v \ D}{\mu} \quad (12)$$

Sendo $\rho = \frac{m}{V} = \frac{F}{A.V}$

Fonte: (Franco Brunetti, 2008)

V = velocidade média do fluido [$m. s^{-1}$]

D = longitude característica do fluxo, o diâmetro para o fluxo no tubo [m]

μ = viscosidade dinâmica do fluido [$N.s.m^{-2}$]

ρ = massa específica do fluido [$Kg.m^{-3}$]

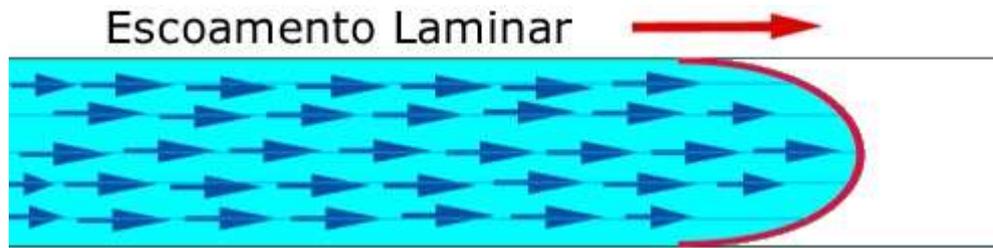
O número de Reynolds permite avaliar o tipo de escoamento, ou seja: a estabilidade ou instabilidade do fluxo; se é do tipo laminar ou turbulento. Para o caso de um fluxo de água num tubo cilíndrico, admitem-se valores de 2.000 a 3.000 como limites para a classificação em laminar ou turbulento.

Experimentalmente, verifica-se que o escoamento de fluidos é tomado como laminar se $\text{Re} < 2 \times 10^3$; turbulento, se $\text{Re} > 3 \times 10^3$; e instável, isto é, de transição (mudando de um regime para outro), se $2 \times 10^3 < \text{Re} < 3 \times 10^3$.

Fluxo laminar ocorre quando as partículas de um fluido movem-se ao longo de trajetórias bem definidas, apresentando lâminas ou camadas, daí o nome laminar, sendo cada uma delas um modo de preservar sua característica no meio, como demonstra a Figura 6. No escoamento laminar, a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência, este escoamento ocorre geralmente a baixas velocidades e em fluídos que apresentam grande viscosidade.

Logo abaixo, há o esquema do fluxo laminar, a fim de que seja visto como ocorre esse deslocamento de forma organizada e direcionada, visto que a tendência desse fluido é que venha a escoar de forma densa e demorada, sem tendência a muitas turbulências.

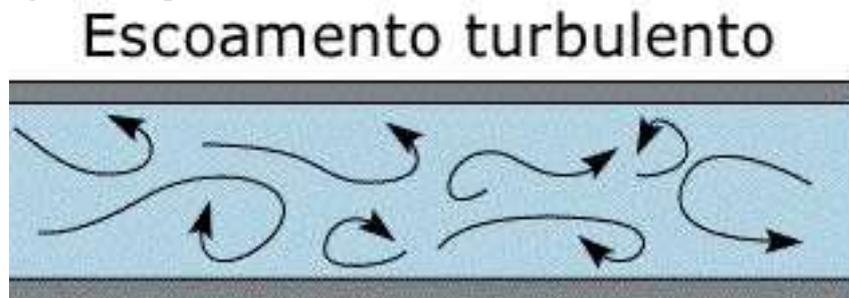
Figura 6 – Esquema de fluxo laminar



Fonte: www.infoescola.com.

O escoamento turbulento ocorre quando as partículas de um fluido não se movem ao longo de trajetórias bem definidas, ou seja, as partículas descrevem trajetórias irregulares, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida como demonstra a Figura 7, este escoamento é comum na água, cuja viscosidade é relativamente baixa.

Figura 7: Esquema de fluxo turbulento



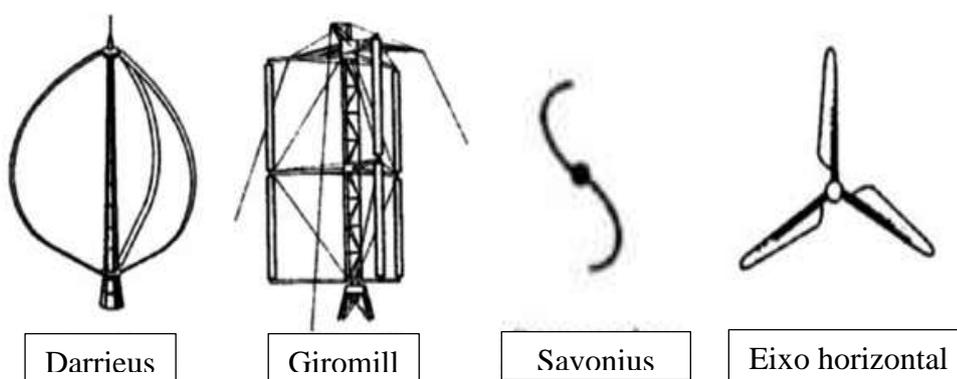
Fonte: www.infoescola.com

Pode-se dizer que dois escoamentos são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. Este é um importante parâmetro para caracterizar as forças dinâmicas atuantes nas pás de um aerogerador, onde existem escoamentos de natureza laminar e turbulento induzindo o aumento considerável das forças de sustentação e arraste (GASCH, 2007).

2.2.4 Fluxo na turbina eólica

Existem dois tipos principais de famílias de turbinas eólicas: as de eixo vertical e as de eixo horizontal. Ambas podem utilizar a força de arraste ou a força de sustentação produzida pelo vento para se movimentarem. Na Figura 8 são apresentados alguns exemplos conhecidos de turbinas.

Figura 8 - Exemplos de turbinas eólicas de eixo horizontal e vertical



Fonte: Eldridge, (1980).

2.2.4.1 Turbinas de eixo vertical

Como o nome indica, este tipo de turbina possui seu eixo perpendicular à direção do vento, não necessitando, portanto, de mecanismos direcionais. As turbinas Darrieus e Savonius são exemplos deste tipo de turbina. As turbinas Savonius são movidas predominantemente por forças de arrasto, embora desenvolvam alguma sustentação. Tem relativamente alto torque de partida, embora em baixa velocidade, sendo usada no bombeamento e moagem. Possui uma grande área para interceptar o vento, o que significa mais material e problemas com a força do vento para grandes velocidades. Sua maior vantagem é a facilidade de construção.

Já a turbina Darrieus, desenvolvida em 1927 pelo francês G.J.M Darrieus, é movida basicamente por forças de sustentação. Podem atingir alta velocidade, mas o torque de partida é aproximadamente nulo. Assim, são mais utilizadas para geração de energia elétrica, movendo-se mais rápido do que o vento. Uma grande vantagem é ter o aerogerador próximo do solo, facilitando a montagem e manutenção (CRESESB, 2001).

2.2.4.2 *Turbinas de eixo horizontal*

Este tipo de turbina é o mais usado atualmente, especialmente nas instalações de maior potência para produção de energia elétrica. Seu rotor possui eixo horizontal, precisando se manter perpendicular à direção do vento para capturar o máximo de energia. O gerador é instalado no alto, junto à turbina como no exemplo apresentado na figura 8. (CRESESB, 2001).

2.2.4.3 *Forças aerodinâmicas na pá*

As principais forças atuantes na pá de uma turbina eólica variam em função dos ângulos de ataque (α) e passo (ψ). A força de sustentação também chamada de força de lift é perpendicular ao fluxo do vento resultante na pá (V_{res}) que é o resultado da subtração vetorial da velocidade do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá da turbina eólica (V_{tan}), conforme a equação abaixo.

$$\overrightarrow{V_{res}} = \overrightarrow{V_w} - \overrightarrow{V_{tan}} \quad (12)$$

Onde:

$$\overrightarrow{V_{tan}} = \Omega_{ROTOR} \times r_{local}$$

Onde:

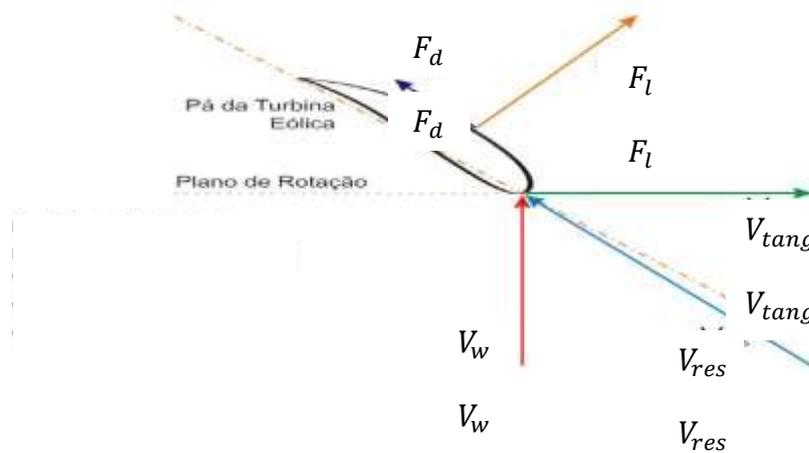
$$\overrightarrow{V_{tan}} = \text{resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto [m.s}^{-1}\text{]}$$

$$\Omega_{ROTOR} = \text{velocidade angular da pá [rad.s}^{-1}\text{]}$$

$$r_{local} = \text{raio local da pá [m]}$$

A força de arrasto é produzida na mesma direção de (V_{res}). A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção (V_{tan}) produz o torque da turbina eólica, demonstrada na figura 9. (CRESESB, 2001).

Figura 9 – Principais forças atuantes em uma pá de turbina eólica



Fonte: Adaptado da Cresesb.cepel.br.

F_d = Força de arrasto [N]

F_l = Força de sustentação [N]

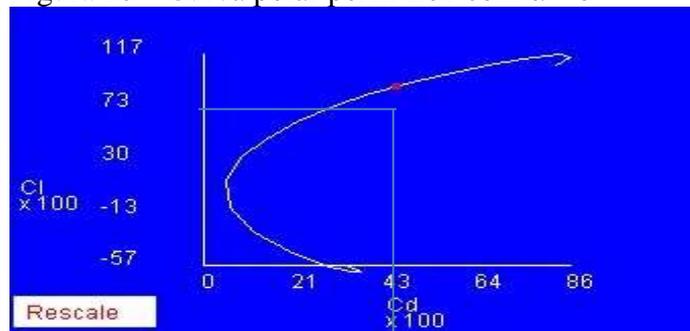
V_w = Velocidade do vento [$m \cdot s^{-1}$]

V_{res} = Velocidade resultante [$m \cdot s^{-1}$]

V_{tan} = Velocidade tangencial [$m \cdot s^{-1}$]

Os coeficientes de sustentação e de arraste são resultado de medidas empíricas realizadas em túneis de vento. Neles, o número de Reynolds pode ser mensurado e adotado no desenvolvimento de modelos de perfis para aviões, automóveis e de edificações, por exemplo. Cada ângulo de ataque (α) específico resulta em valores específicos de coeficientes de sustentação e de arraste, conforme o exemplo da curva polar com ($\alpha = 5^\circ$) do perfil E61 representado na figura 10.

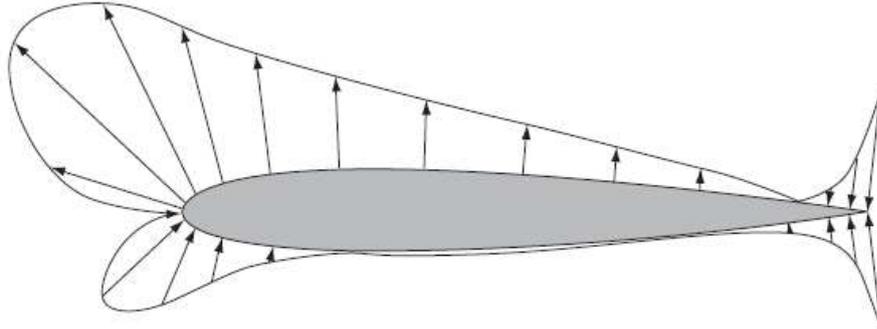
Figura 10 – Curva polar perfil E61 com $\alpha = 5^\circ$



Fonte: FoilSimIII.

O que acontece, na pá, são pressões diferentes, que resultam em forças atuando em toda a superfície, variando com a velocidade, o ângulo de ataque e o tipo de fluxo do ar a figura 11 ilustra estas forças (GASCH, 2007).

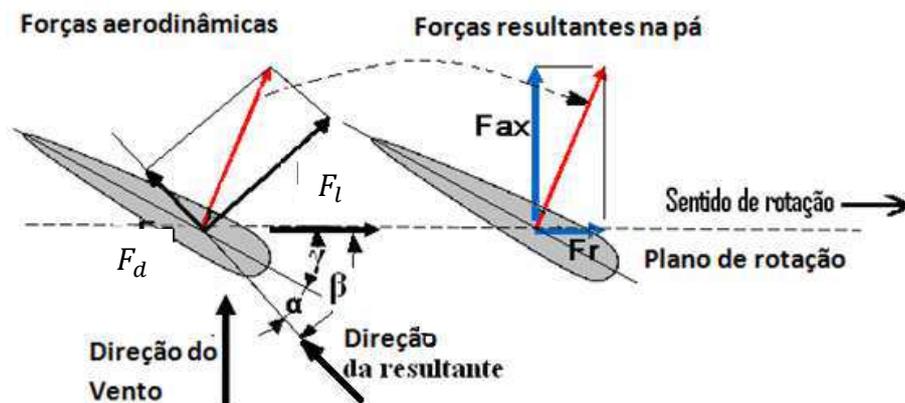
Figuras 11 – Distribuição das forças aerodinâmicas em um perfil de pá NACA0012 com ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$



Fonte: (BURTON, 2001).

As forças que giram as pás em torno do centro do rotor são de origem aerodinâmica (forças de sustentação e de arraste). A resultante se divide em força no sentido da rotação do rotor e a força perpendicular à rotação do rotor, conforme esquema da Figura 12. (GASCH, 2007).

Figura 12 – Esquema das forças aerodinâmicas e resultantes das forças que giram a pá



F_d = Força de arrasto [N]

F_l = Força de sustentação [N]

F_{ax} = Força axial [N]

F_r = Forçarotacional [N]

α = Ângulo de ataque

β = Ângulo resultante

γ = Ângulo de passo

□

Fonte: Adaptado do (GASCH, 2010).

A força resultante rotativa F_r é dada pela equação 13

$$F_r = \text{Sen}(\beta)F_s - \text{Cos}(\beta)F_a \quad (13)$$

Força resultante axial F_{ax} é dada pela equação 14

$$F_{ax} = \text{Cos}(\beta)F_s + \text{Sen}(\beta)F_a \quad (14)$$

Onde:

β = Ângulo da velocidade resultante (Vento – veloc. rotativa da seção da pá) [°]

F_s = Força de sustentação [N]

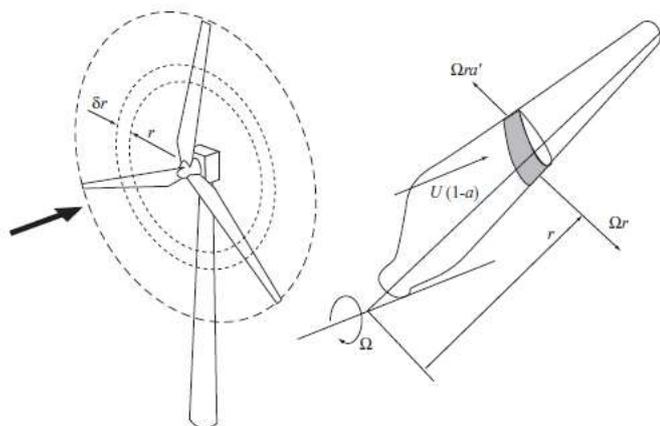
F_a = Força de araste [N]

F_r = Força radial [N]

F_{ax} = Força axial [N]

A força de sustentação se define como a força perpendicular na direção do movimento do fluido em volta da pá, enquanto que a força de arraste atua na direção deste fluido ou a soma das forças resultantes ao longo das pás (Figura 13), junto com a alavanca que a pá representa em relação ao eixo do cubo, geram uma rotação com torque, dependendo da velocidade do vento livre e das forças aerodinâmicas nas pás, segundo o esquema da figura 14 (BURTON, 2008):

Figura 13 – Somas das forças resultantes ao longo da pá



Fonte: (BURTON, 2008).

2.3 Concepção do disco atuador

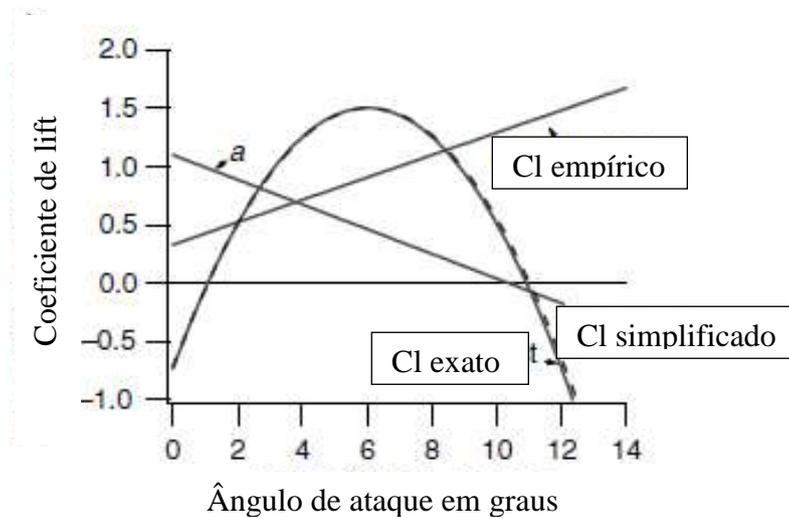
2.3.1 *Elementos das pás*

As pás são os perfis aerodinâmicos que interagem com o vento, convertendo parte da energia cinética do vento em trabalho mecânico. Elas podem ser fabricadas com diferentes materiais, mas normalmente são feitas de resina epóxi e/ou madeira, reforçadas com fibra de vidro, já que são submetidos a um ambiente de carregamento incomum (BARROS, 2010), caracterizado pela variedade de condições ambientais externas, carregamentos severos e complexos incluindo mais de 100 milhões de ciclos de fadiga ao longo de sua vida útil, além do complexo estado de tensões na estrutura interna da pá. Apesar do aparecimento de diferentes tipos de pás eólicas nos últimos anos, a indústria convergiu para estrutura de eixos horizontais (MASTEMBERG, 2004).

Manwell (1990) com o método simplificado é possível calcular considerando o máximo rendimento do disco atuador que é dado pelo limite de BETZ. A potência retirada do vento determina o C_p do disco atuador turbina de eixo horizontal e é aplicável também no controle de estol. O método utiliza o elemento da lâmina previamente conhecido e incorpora um modelo analítico para encontrar o ângulo de ataque e a torção da pá. Dependendo das perdas serão feitas alterações.

O método assume duas condições: a primeira delas assume que a seção onde o coeficiente de sustentação aerofólio F_S (Força de Lift) e o ângulo de ataque tenham uma relação linear aplicado à região de interesse e a segunda que o ângulo de ataque deve ser suficientemente pequeno para que possa ser usado como demonstra a figura 14.

Figura 14 - Método de cálculo de um elemento da lâmina, para o fator de indução axial



Fonte: Adaptado (MANWELL, 1990).

De acordo com o tipo de aplicação escolher uma relação de velocidade de ponta da pá TSR (TIP SPEED RATIO), demonstrado na tabela 3, quando necessitar de maior torque usar $1 < \lambda < 3$, aplicação do moinho de vento. Quando necessitar de maior potência usar $4 < \lambda < 10$, aplicado à geração de energia elétrica. Os aerogeradores com maior velocidade TSR usam menor quantidade de material nas pás e caixas de câmbio, porém exigem aerofólios mais sofisticados (MANWELL, 1990).

Tabela 2 - Sugestão do número de pás, B, por diferentes tipos de velocidade de ponta

λ	B
1	8-24
2	6-12
3	3-6
4	3-4
>4	1-3

Fonte: Adaptado do (MANWELL, 1990).

O conjunto de pás para aerogeradores em geral ficam entre 2 e 4 pás formando o rotor. O comprimento varia entre 0,4m (para potências de 0,1kW) e 16m (para potências de até 70kW). Na maioria das vezes, as pás são confeccionadas em compósitos de fibra de vidro com epóxi ou poliéster (HEIER, 2007a).

Manwell (1990), em primeiro lugar, uma relação entre velocidade de ponta e do vento (λ) o número desejado de pás (B), o raio (R) e um aerofólio com Lift e Drag conhecidos em função do ângulo de ataque. O ângulo de ataque proporciona um coeficiente de sustentação em que o aerofólio deve trabalhar e deve ser escolhidos quando C_d / C_l for mínimo a fim de aproximar do pressuposto C_d (coeficiente de Drag = 0). Essas definições permitem calcular a torção (twist) e a distribuição da corda (c) de uma pá.

Tabela 3 - Torção e corda distribuídas com rendimento (Betz), lâmina ideal; r / R , fração do raio e rotor; c / R , corda

r/R	c/R	Ângulo de torção (deg)	Ângulo relativo do vento (deg)	Ângulo de pitch (deg)
0.1	0.275	38.2	43.6	36.6
0.2	0.172	20.0	25.5	18.5
0.3	0.121	12.2	17.6	10.6
0.4	0.092	8.0	13.4	6.4
0.5	0.075	5.3	10.8	3.8
0.6	0.063	3.6	9.0	2.0
0.7	0.054	2.3	7.7	0.7
0.8	0.047	1.3	6.8	-0.2
0.9	0.042	0.6	9.0	-1.0
1	0.039	0	5.4	-1.6

Fonte: (MANWELL, 1990).

Albiero (2010) defende que para condições de baixo vento, estudos identificaram os perfis de planadores como detentor de excelente desempenho a baixas velocidades de vento, em especial o perfil Eppler 61 (E61). O autor comenta ainda que é possível modelar uma pá de aerogerador para atender a uma propriedade familiar no estado do Ceará com ventos de $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ utilizando perfil cambado (E61) confeccionado em fibra vegetal.

2.3.2 *Materiais compósitos*

O avanço tecnológico demanda cada vez mais materiais que combinem propriedades geralmente não encontradas em materiais convencionais, como os metálicos, os

cerâmicos e os poliméricos. Os materiais compósitos podem ser definidos como aqueles que consistem de duas fases, insolúveis entre si, que são combinados para formar um material de engenharia útil, com certas propriedades que não se encontram nos materiais constituintes isoladamente. A denominação destes materiais é bastante diversificada, sendo tratados na literatura como: compostos, conjugados ou compósitos (CALLISTER, 2002; MANO, 2001; ASTM D3878-95).

Estes materiais compósitos fazem parte de uma extensa e importante classe de materiais de engenharia, sendo usados em uma grande variedade de aplicações, como por exemplo, na indústria automotiva, aeronáutica, naval e em equipamentos médicos (MORTENSEN, 2007). O processamento adequado de materiais compósitos torna possível a obtenção de produtos com propriedades tais como: baixa massa específica (inferior à dos metais e cerâmicas), resistência mecânica elevada, alta tenacidade, resistência à corrosão, resistência química, estabilidade térmica e resistência à fadiga. (LEVY NETO e PARDINI, 2006; MANO e MENDES, 2001).

Os compósitos podem surgir de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros. A fase dispersa pode apresentar diversas geometrias como partículas ou fibras (Figura 15). No caso de reforço com fibras, estas podem ser contínuas ou descontínuas, orientadas ou com distribuição aleatória, podendo ser obtidas em uma variedade de formas, como mantas e preformas têxteis de diferentes arquiteturas (CALLISTER, 2002; LEVY NETO e PARDINI, 2006; ELIAS, 1997; ASKELAND, 1994).

Figura 15 - Esquema de classificação para vários tipos de compósitos



Fonte: (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

2.3.3 *Fibras da carnaúba*

A carnaubeira (*Copernicia prunifera*) é uma espécie de palmeira nativa do Brasil com altura entre 7 e 10 metros, podendo atingir os 15 metros. A planta possui um tronco reto e cilíndrico com diâmetro entre 15 e 25 centímetros. Geralmente ocorre nos pontos mais próximos dos rios, predominantemente em solos argilosos (pesados), aluviais (de margens de rios) e com a capacidade de suportar alagamento prolongado durante a época de chuvas, além de ser bastante resistente a elevados teores de salinidade afirmam (CUNHA, 1994; LORENZINE *et al.*, 1996). Apresenta também elevada capacidade de adaptação ao calor, suportando 3.000 horas de insolação por ano. Segundo Duque et al. (2004), “a idade das palmeiras, o tipo de solo, o clima e a proximidade com o mar, são fatores que influenciam na produção de cera”.

As folhas da carnaubeira são dispostas de modo a formar um conjunto esferoidal e a copa apresenta tonalidade verde levemente azulada, em consequência da cera que recobre a lâmina em forma de leque de até 1,5 m de superfície plissada com a extremidade segmentada em longos filamentos mais ou menos eretos e rígidos. A lâmina da folha é afixada ao tronco por pecíolos rígidos de até 2 metros, recobertos parcialmente, principalmente nos bordos, de espinhos rígidos em forma de “unha-de-gato” (NETO, 2004).

O corte das folhas é feito no período seco (verão), variando, portanto, de julho a dezembro, dependendo da região e da extensão do período sem chuvas. A cera que recobre a palha é uma consequência de sua adaptação às regiões secas, dado que esta camada cerífera reflete a luz, o que reduz danos à fotossíntese, por reduzir o aquecimento das folhas. A camada de cera dificulta a perda de água por transpiração e protege a planta contra o ataque de fungos. (MESQUITA, 2005).

Essa palmeira ocorre no Nordeste brasileiro nos vales dos rios da região da caatinga, principalmente do Parnaíba e seus afluentes, do Jaguaribe, do Acaraú, do Apodi e do médio São Francisco. Também pode ser encontrada nos estados do Pará, Tocantins, Maranhão e Goiás.

A tabela 5 apresenta a produção obtida entre os anos de 1990 a 2004, em toneladas, na extração de carnaubeira. Por ela, podemos visualizar, a seguir, que, de acordo com o IBGE, o Ceará possui grande influência quando se trata da produção e extração desse vegetal. Logo, além dos usos básicos dessa palmeira, como para uso da cera em benefício

próprio da planta, vemos que há, também, uma forte tendência para fins financeiros que venham a contribuir para a economia do Estado.

Tabela 4 – Quantidade e valor dos produtos da extração vegetal, por produtos, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação – 2009

Grandes Regiões e Unidades da Federação	Fibras							
	Buriti		Carnaúba		Piaçava		Outras	
	Quantidade (t)	Valor (1 000 R\$)						
Brasil	803	1 404	1 540	1 019	72 232	110 245	500	920
Norte	611	400	-	-	1 681	2 448	415	746
Rondônia	-	-	-	-	-	-	-	-
Acre	356	134	-	-	-	-	-	-
Amazonas	1	2	-	-	1 681	2 448	413	741
Roraima	-	-	-	-	-	-	-	-
Pará	252	261	-	-	-	-	1	4
Amapá	-	-	-	-	-	-	-	-
Tocantins	1	4	-	-	-	-	-	-
Nordeste	192	1 003	1 540	1 019	70 551	107 797	82	170
Maranhão	132	887	9	20	9	14	-	-
Piauí	-	-	-	-	-	-	-	-
Ceará	4	5	1 454	975	-	-	81	169
Rio Grande do Norte	-	-	77	23	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	-	-	-	-	-	-	-	-
Alagoas	-	-	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-	-	-
Bahia	56	110	-	-	70 542	107 783	1	1

Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de Agropecuária, Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2009.

Principais constituintes da fibra in natura foram isolados e estão apresentados na tabela 6, os percentuais obtidos de lignina, celulose e hemicelulose, teor de umidade e cinzas foram identificados por (CARVALHO, 2004).

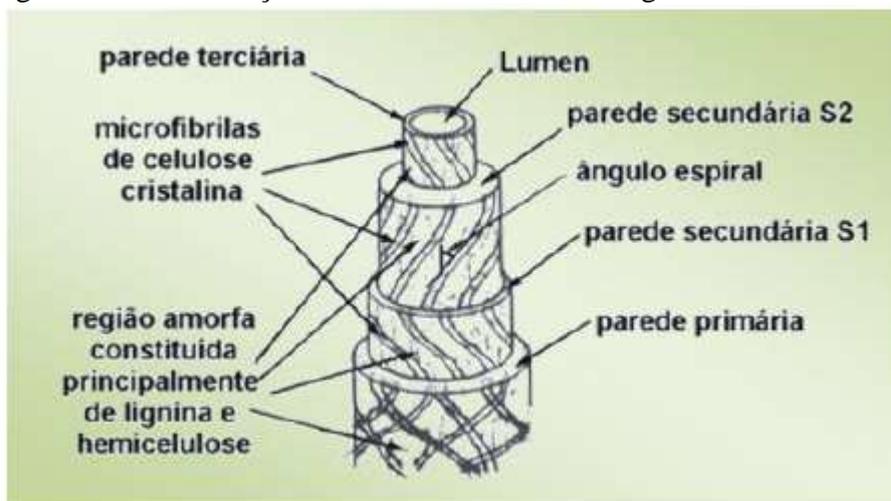
Tabela 5 - Composição química da fibra da folha de carnaúba

Componente	Percentagem média (%)
Celulose	58,04 ± 4,49
Hemicelulose	14,02 ± 0,64
Lignina	19,03 ± 1,02
Umidade	7,53 ± 0,63
Cinzas	1,80 ± 0,47

Fonte: CARVALHO, (2004).

A composição química da folha e a produção da fibra da carnaúba no Ceará são fatores determinantes para a utilização dessa fibra para fabricação de compósitos. A Figura 16 ilustra as dimensões das fibras lignocelulósicas mais comuns. Esse tipo de informação é crítica para selecionar uma determinada fibra para um uso específico.

Figura 16 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal



Fonte: COUTTS, (1992).

Segundo Couttes et al (1992), as células da fibra têm de 10 μm a 25 μm de diâmetro e são compostas por quatro camadas (paredes) de microfibrilas; parede primária, mais externa, de estrutura reticulada; parede secundária S1, de estrutura também reticulada; parede secundária S2, onde as microfibrilas estão orientadas segundo um ângulo θ com relação ao eixo longitudinal da célula em espiral e, por fim, a parede terciária, mais interna, também com as microfibrilas em forma de espiral.

A parede secundária S2 é a de maior espessura e, também, a de maior teor de celulose. No interior da célula, há uma cavidade central de secção elíptica, com dimensões de 5 μm a 10 μm , denominada lúmen. As diversas células que compõem a fibra encontram-se aglomeradas pela lamela intercelular, composta de hemicelulose, pectina e, principalmente lignina (70% em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade que se chama lacuna, (COUTTS, 1992).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 *Local do desenvolvimento do trabalho*

O projeto e o desenvolvimento deste trabalho foram realizados nas instituições Universidade Federais do Ceará (UFC) e Instituto Federal de educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE). O desenvolvimento, ensaios de laboratórios e máquinas, ferramentas e softwares pertencem aos laboratórios:

- Laboratório de ensaios Mecânicos (LEM - UFC) a máquina EMIC foi utilizada para ensaio dos folíolos de Carnaúba em estado desidratado.
- Laboratório (CAD-CAN – IFCE) os softwares SolidEdge versão ST6 e Computer-aided design (CAD) NX4 para desenho e comunicação com CNC.
- Laboratório Máquinas Operatrizes (LMO – IFCE) foi utilizado ferramentas e equipamentos de corte e soldas, DISCOVERY 1000 centro de usinagem verticais.
- Laboratório de ensaios Mecânicos (LEM - IFCE) Instrumentos de medição
- Laboratório de Maquinas Térmicas (LMT - IFCE) ferramentas em geral, equipamentos para pinturas e aplicação de resinas, bomba de vácuo e instrumentos de medição de volume (béquer, proveta etc.).
- Laboratório de Química (IFCE) foi utilizado à balança de precisão e pipetas.

3.1.2 *Material utilizado para produção da pá*

O material usado para produzir o molde foram:

- Primer PU Alto Sólidos DUL2006 dois componentes com alto teor de sólidos, utilizado para enchimento e isolamento da superfície usinada da madeira.
- Bomba de vácuo rotativa em banho de óleo usada para obter a pressão absoluta requerida $<0,10$ (mbar).
- Compressor de ar alternativo com Volume do reservatório de 261(litros) e pressão de operação máxima 175(psi).

- Resina DERAKANE MOMENTUM 411-350 é uma resina epóxi éster vinílica feita a partir de uma resina epóxi do bisfenol-A que possui excelente resistência química a uma ampla variedade de produtos, permite um aumento da espessura de laminação por seção, à baixa viscosidade é projetada para infusão a vácuo, oferece melhoria da cura a temperatura ambiente sem necessidade de forno o baixo índice exotérmico e a rápida cura em peças de laminados finos.
- Resina POLYDYNE 4000 tem as principais vantagens das resinas poliéster, ou seja, são de baixa viscosidade o que permite uma fácil impregnação das fibras e baixíssimo custo, no entanto, o alto nível de retração e elevada exotermia prejudica a interface fibra/matriz o que resulta em redução das qualidades mecânicas, fragilidade, baixa tolerância a ataques químicos.
- Manômetro estireno, comercialmente o Estireno é co-produzido com Óxido de propileno, monómero de Estireno/Óxido de Propileno. No processo da resina funciona como agente redutor da viscosidade melhorando o processo de infusão.
- Polygel® PLG 195 PRIMER-G é um Líquido viscoso e pigmentado de acordo com a cor solicitada, é formulado a partir de resinas especiais do tipo poliéster ortoftálica, pigmentos, agentes tixotrópicos e aditivos, aplicado em peças que serão lixadas para posterior acabamento final.
- DISCOVERY 1000 centro de usinagens verticais Siemens Sinumerik 810D com ShopMill.
- Balança analítica Marte Shimadzu AY220 para pesar os reagentes.
- Recipientes em geral.

3.1.2.1 Propriedades mecânicas dos materiais

Na avaliação das propriedades mecânicas deve-se levar em conta a complexidade da interação mecânica entre o reforço e a matriz. As propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, à compressão, à flexão, a impacto, à fadiga, e à abrasão além do módulo de elasticidade em tração e flexão, dureza e tenacidade à fratura (PASSOS, 2005).

Segundo (CALLISTER, 2002), no ensaio de tração são determinadas as propriedades de resistência à tração uniaxial, módulo de elasticidade, alongamento e coeficiente de Poisson. A resistência à tração é avaliada pela carga aplicada ao material por unidade de área no momento de ruptura. O alongamento representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração no momento de ruptura. O módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional à tensão. O coeficiente de Poisson é definido como a razão negativa entre a deformação transversal e a correspondente deformação longitudinal de um corpo de prova sob tensão uniaxial abaixo do limite de proporcionalidade do material.

Os vários processos e materiais envolvidos na fabricação da pá atenderam aos critérios de tomada de decisões baseada nas propriedades mecânicas, físicas e químicas. A complexidade de cada etapa do desenvolvimento sobrevinha das limitações de equipamentos, laboratórios, conhecimento, tempo e produção de componentes para solucionar as falhas que surgiram na produção da pá.

Durante os estudos, foram elaborados ensaios práticos desenvolvidos pelo autor fundamentando a tomada de decisão.

3.2 Métodos

3.2.1 *Escolha do rotor eólico*

Os critérios de escolha do aerogerador foram: disponibilidade do equipamento montado no campus da Universidade Federal do Ceará (UFC), a estação meteorológica próxima, os dados reais obtidos na geração de energia e velocidade dos ventos do local, o aerogerador atende a uma pequena propriedade rural e será possível a substituição das pás.

Os dados técnicos do Aerogerador estão na tabela 7.

Tabela 6 - Dados técnicos do Aerogerador

Potência (W)	1000
Quantidade de lamina	3
Diâmetro da lâmina do rotor (m)	3.1
Velocidade inicial do vento (m / s)	3.0
Velocidade do vento nominal (m / s)	9.0
Taxa de rotação (r / min)	500
Proporção de energia eólica utilizando (Cp)	0.45
Torre de altura (m)	8

Fonte: Manual do Aerogerador.

Foi considerada a média de ventos de $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ como parâmetro de entrada do projeto, a pá da turbina eólicas desenvolvida tem classificação quanto à sua forma construtiva, pertencem as Turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEH) e é classificada quanto à sua potência nominal 1 kw como turbina de pequeno porte, a classificação abrange até 70kw de potência, parâmetro obtido da norma IEC 61400-1.

Para a fabricação da pá foi definido que seria utilizado o método simplificado pela Teoria de Elemento de Pá e teoria do momento, as perdas por rotação com arrasta $CD=0$, solidez do rotor, fator de correção de Prandtl e peso da pá foram desprezados, o fator de indução no rotor é de $1/3$ rendimento máximo. Relacionando-se as expressões das forças tangenciais e axiais, obtêm-se os fatores de interferência tangencial e axial, com os quais podem ser calculados a velocidade relativa em cada raio local da pá, os ângulos e forças aerodinâmicas de cada seção extraíndo torque e potência da turbina.

3.2.2 *Parâmetros do rotor para condições específicas*

3.2.2.1 *Velocidade específica da pá (Tip Speed Ratio)*

Segundo (CARVALHO, 2003), existe uma velocidade específica representada na equação (15) por (λ) , que é um número adimensional e é obtido pela relação entre a velocidade de rotação na ponta da pá V_r , em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, e a velocidade V_u do vento, em $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\lambda = \frac{V_r}{V_u} \quad (15)$$

λ = velocidade específica de projeto

v_r =velocidade de ponta da pá [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

v_u = velocidade do vento [$m. s^{-1}$]

A velocidade de rotação da pá v_r pode ser definida pelo produto da velocidade angular ω da pá, em $rad. s^{-1}$, e o raio R desta, em metros, resultando na equação 16.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_u} \quad (16)$$

ω = velocidade angular da pá [$rad. s^{-1}$]

R = raio da pá [1,45m]

λ = Velocidade específica de projeto [$\lambda=6$]

V_u = velocidade do vento [$3,5m. s^{-1}$]

$\Omega = 14,48 rad. s^{-1}$

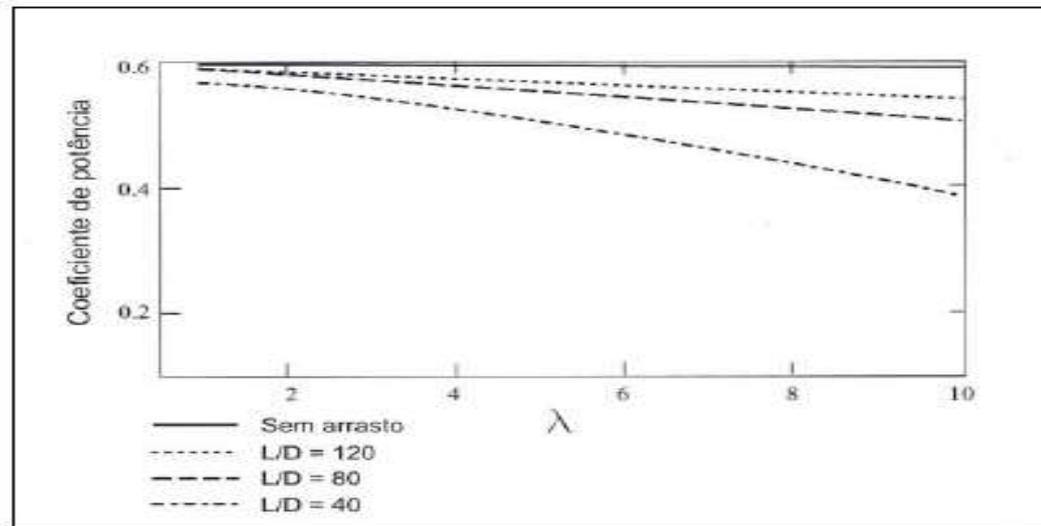
Segundo Manwell (2001), de acordo com a aplicação é escolhido um λ adimensional que relaciona o perfil da pá com a velocidade de ponta (TSR), para moinhos de vento e acionamento de bombas é necessário mais torque e $1 < \lambda < 3$. Para geração de energia com a utilização de caixas de redução o $4 < \lambda < 10$. A aplicação no projeto é de um perfil que potencialize a sustentação (lift) o que requer um sofisticado aerofólio com menor peso.

3.2.2.2 Definição do perfil da pá

A análise do perfil foi conduzida com auxílio do software JavaFoil, Hepperle (Disponível em www.javafoil.com), 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.

Os conceitos de aerodinâmica aplicados para perfis de asas de aviões podem ser aplicados em análise de pás para aerogeradores, a relação Cl e Cd em função da velocidade de ponta define o coeficiente de potência, que vem a ser demonstrado, por meio de um gráfico, logo a seguir, pela figura 17.

Figura 17: Sustentação (L) e arrasto (D) em função do coeficiente de potência e velocidade específica

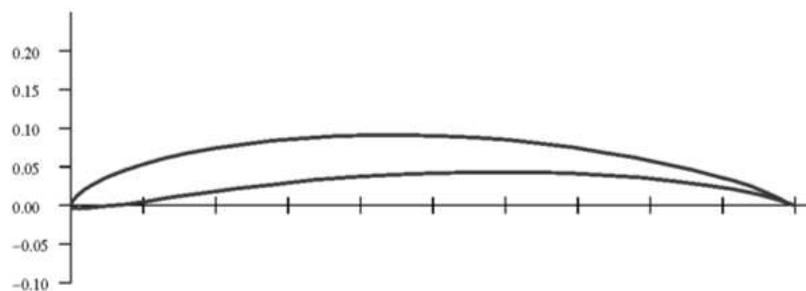


Fonte: Adaptado do BURTON, (2001).

Nessa 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 do rotor e a velocidade do vento.

O objetivo deste trabalho é modelar uma pá de aerogerador para atender a uma propriedade familiar no estado do Ceará (ALBIERO, 2012) com a utilização de perfil cambado (E61) a ser confeccionado em fibra vegetal ilustrado na figura 18.

Figura 18: Forma do perfil aerodinâmico E61



Fonte: AID, (2013).

A partir do perfil E61 definido, é possível obter resultados de diferentes coeficientes de sustentação para diferentes ângulos de ataque. O perfil mostra que o maior valor de C_l está para ângulo de ataque $5,7^\circ$ (AID, 2013), entretanto deve ser considerada a relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto ($C_l/C_d=80,133$) que apresenta como resultado a maior razão, obtendo assim maior sustentação. Por esse motivo, o ângulo de ataque α mais adequado para o perfil em análise é $5,7^\circ$. 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.

3.2.2.3 Potência do rotor com CP (BETZ)

$$P_{eixo} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot v_u^3 \cdot \pi \cdot R^2 \quad (17)$$

C_p =Coeficiente de potência Betz [0.593]

ρ =Massa específica do fluido [$1,225 \text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

v_u =Velocidade do vento [$3.5 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

R =raio do rotor [1.45m]

$$P_{eixo} = 70,89 \text{ w}$$

3.2.2.4 Geometria longitudinal da pá

Segundo Manwell, (2001) “a pá teórica pode ser dividida entre 10 a 20 elementos para aperfeiçoar o rotor teórico em função do raio local”.

De posse do λ de projeto com o melhor desempenho da pá, divide-se em seções para obter a melhor performance parcial definido por λ_r (raio local). A pá foi dividida em dez seções e para cada seção, é calculado o ψ ângulo relativo do vento que é a soma do β ângulo de torção mais o α ângulo de ataque.

Segundo Manwell (2001), para encontrar o ângulo relativo e a corda de cada seção da pá utilizam-se as equações 18 e 19.

$$\psi = \tan^{-1}\left(\frac{2}{3\lambda r}\right) \quad (18)$$

$$c = \frac{8 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin(\psi)}{3 \cdot N \cdot Cl \cdot \lambda r} \quad (19)$$

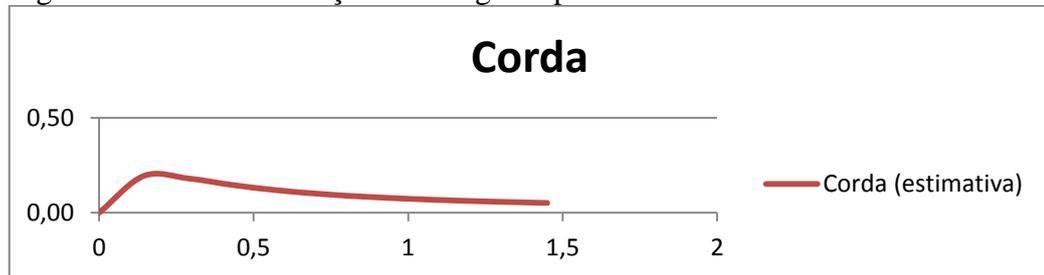
Tabela 7 – Distribuição do twiste ψ e corda ao longo da pá

r/R	Corda (m)	ψ Ângulo deg (vento relativo)	θ_p Ângulo deg (seção de pitch)	α Ângulo deg (ataque)
0	0,19	39,35749565	34,3575	5
0,1	0,18	26,53704739	21,53705	5
0,2	0,15	19,36973607	14,36974	5
0,3	0,12	15,07990997	10,07991	5
0,4	0,10	12,28996588	7,289966	5
0,5	0,08	10,34940733	5,349407	5
0,6	0,07	8,928331836	3,928332	5
0,7	0,06	7,845525955	2,845526	5
0,8	0,06	6,994318008	1,994318	5
0,9	0,05	6,308214805	1,308215	5

Fonte: produzida pelo autor.

A distribuição da corda em metros nas seções da pá ilustrada na figura 19.

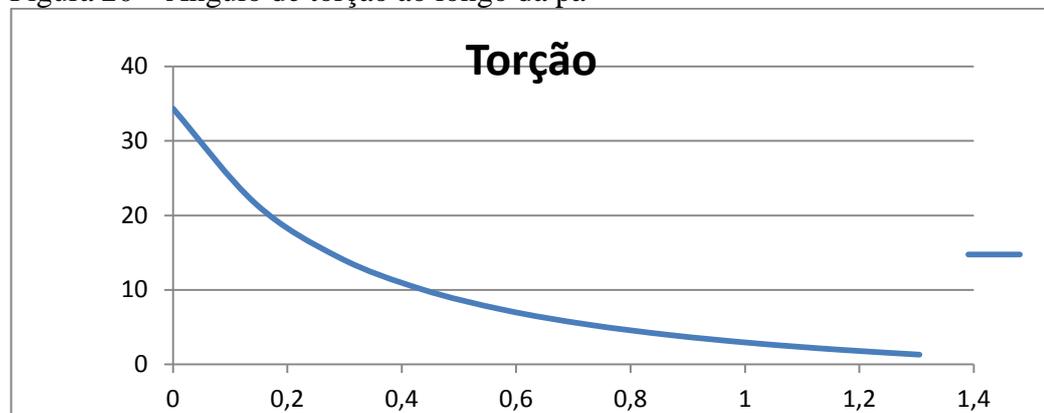
Figura 19 – Corda das seções ao longo da pá



Fonte: Produzida pelo autor.

A distribuição da torção em graus nas seções da pá ilustrada na figura 20.

Figura 20 – Ângulo de torção ao longo da pá



Fonte: Adaptada pelo autor.

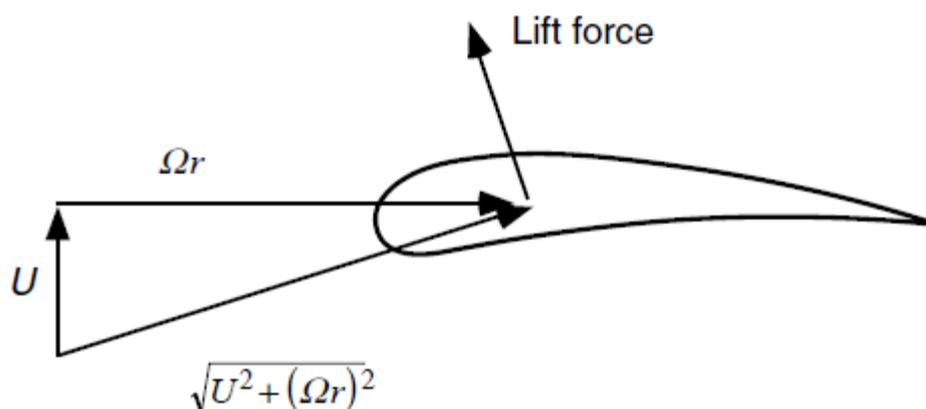
Foi calculado a velocidade do vento relativo nas seções da pá e utilizado nos dados de entrada do Software FoilSimIII, A partir da simulação do Software, os resultados de cada seção do perfil compõe a força total de lift e drag da pá. A tabela 7 demonstra o vento relativo e a figura 21 ilustra as forças do vento (V_u) e a velocidade do rotor na seção de raio r ($\Omega.r$) da pá.

Tabela 8 – Vento relativo ao longo das seções da pá

r/R	Corda (m)	φ Ângulo graus (vento relativo)	V_{rel} (m.s ⁻¹) (vento relativo)
0,1	0,19	39,35749565	5,190652558
0,2	0,18	26,53704739	5,372669709
0,3	0,15	19,36973607	7,135914623
0,4	0,12	15,07990997	6,181613483
0,5	0,10	12,28996588	6,20483824
0,6	0,08	10,34940733	5,505386456
0,7	0,07	8,928331836	7,815151876
0,8	0,06	7,845525955	316,2370051
0,9	0,06	6,994318008	6,672259867
1,0	0,05	6,308214805	6,319259221

Fonte: Adaptada pelo autor.

Figura 21 – Forças e velocidade do vento na pá



Fonte: MANWELL, (2001).

4 RESULTADOS

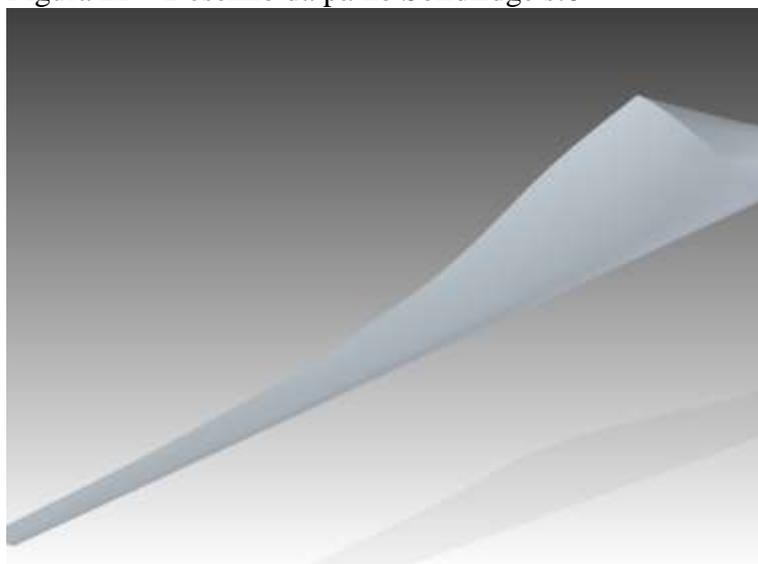
4.1 Preparação do molde e fabricação das pás

4.1.1 Desenho da pá e molde de injeção

Na modelagem 3D, figuras 22 e 23 foram utilizados os dados obtidos na fase anterior, como perfil aerodinâmico escolhido com auxílio do software FoilSim III, comprimento da pá, corda da pá de acordo com a torção (twist) conforme o método

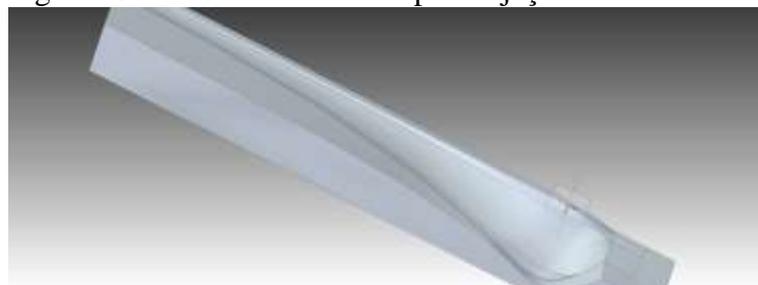
apresentado anteriormente. Para essa etapa de modelagem, foi definido o Software Solidedge ST6 e a programação CAD-CAN NX4. Com esse software, pode-se modelar e editar curvas, superfícies e sólidos não regulares com precisão a partir do modelo 2D do perfil, foi possível utilizar ferramentas do software para gerar modelos volumétricos e depois de concluído o desenho da pá iniciou-se parametrização para usinagem com as ferramentas do software NX4, identificando velocidade de corte e as estratégias para otimizar o tempo de usinagem com a melhor sequencia de ferramentas de corte.

Figura 22 – Desenho da pá no SolidEdge st6



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 23 – Desenho do molde para injeção da resina



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 *Usinagem dos moldes inferior e superior*

Devido à complexidade da usinagem da pá, muitos recursos de programação foram inseridos na paramétrica do CNC, figuras 24 e 25 ilustram a confecção de dois moldes assimétricos.

Figura 24 - DISCOVERY 1000 centro de usinagem verticais



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 25 - Fresa ball para acabamento da superfície do molde



Fonte: Elaborada pelo autor.

A estanqueidade só é possível com a precisão de um centro de usinagem e um anel de borracha entre os moldes ilustrados na figura 26.

Figura 26 - Molde preparado para injeção



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.3 *Matrizes poliméricas*

A matriz polimérica pode ser de dois tipos, termorrígida ou termoplástica, é responsável pela transferência dos esforços, pelo alinhamento das fibras e pela proteção das mesmas da abrasão e da degradação ambiental. Este componente está diretamente relacionado com as resistências à compressão e ao cisalhamento do compósito. A matriz confere ainda rigidez ao material (MASTEMBERG, 2004). O reforço, que pode ser constituído por partículas, fibras picadas ou contínuas e pelos (whiskers).

Na fabricação das pás são utilizadas fibras contínuas. Este componente é, prioritariamente, responsável pela resistência mecânica aos esforços, principalmente, de tração e fadiga. Pelo fato do material compósito ser formado por dois ou mais componentes, existem diferentes possibilidades de combinações. Devido a isso, os compósitos são desenvolvidos para atender propriedades específicas, como rigidez, resistência, tolerância a danos, resistência à corrosão, condutividade térmica, entre outras, para uma aplicação particular (MASTEMBERG, 2004; SHACKELFORD, 2008).

A área de materiais compósitos tem mostrado um desenvolvimento contínuo, motivado pela sua crescente aplicação em setores que exigem produtos com elevados valores de resistência e menor massa específica, em relação aos metais. A seleção entre as várias opções de materiais, tanto a matriz polimérica quanto o reforço, está condicionada a fatores

como desempenho, custo, condições de processamento e disponibilidade (NOGUEIRA et al., 1999).

Esses materiais são denominados compósitos poliméricos avançados ou estruturais (Nogueira et al., 1999; Ellis, 1993), quando a combinação do reforço contínuo com a matriz polimérica confere ao compósito obtido baixos valores de massa específica, por exemplo de 1,2 a 3,0 $g.cm^{-3}$, e elevados valores de resistência mecânica e rigidez, por exemplo, resistência à tração de 700 e 2500 MPa para compósitos reforçados com fibras de vidro e carbono, respectivamente.

Os materiais poliméricos para aplicação estrutural em aeronaves, por exemplo, utilizam fibras de excelente qualidade e resina epóxi de elevada resistência, pertencentes a gerações de polímeros de diferenciados desempenhos, que apresentam maior tolerância a danos, resistência ao impacto e boas propriedades nas condições de temperatura e umidade elevadas (FRANCO, 2003).

4.1.3.1 Resinas aplicadas nas pás

As resinas epóxi (também denominadas epoxídicas), poliéster, poliamida e éster-vinílica são as matrizes poliméricas mais usadas no processamento de materiais compósitos. As resinas epóxi foram introduzidas no mercado após a segunda grande guerra e podem ser consideradas como um avanço tecnológico sobre alguns termorrígidos existentes, como, por exemplo, a resina fenólica e poliéster (COSTA, 1998).

A reação química de cura é acelerada com o aumento da temperatura e é irreversível, ou seja, a polimerização se mantém após o resfriamento. A rigidez e a maior estabilidade térmica apresentada pelos polímeros termorrígidos, em particular as resinas epóxi, tornam essas resinas atrativas para aplicações estruturais Ancelotti Jr., (2006).

4.1.3.2 Pá de resina poliéster

As pás de amostras fabricadas com resina poliéster POLYDYNE 4000-10 da CCPcomposites tem as seguintes características: baixa viscosidade da resina o que permitiu fácil impregnação das fibras e a possibilidade de infusão.

Entretanto, verificou-se alto nível de contração e algumas trincas quando catalizado com 4% percentual máximo de catalizador, elevada exotermia com pico de 180°C que prejudicam a interface fibra/matriz, o que resulta em piores qualidades mecânicas tais como a fragilidade, baixa tolerância a ataques químicos, desvantagens importantes que limitam a aplicação.

4.1.3.3 *Pá de resina vinil éster*

As pás de amostras fabricadas com a resina epóxi éster vinílica DERA KANE MOMENTUM™ 411-350 tem as seguintes características: as resinas epoxi possuem a resistência à fratura, a conveniência e a segurança no manuseio devido a baixas emissões gasosas, a baixa contração (ao solidificar-se, as dimensões permanecem quase constantes), boa estabilidade dimensional e térmica.

Entretanto, a sensibilidade à umidade, a cura lenta e a limitada temperatura máxima de operação são desvantagens a serem avaliadas. Devido à resistência superior da resina vinil éster, o laminado (compósito), apresenta melhor resistência ao impacto e menor geração de microfissuras.

4.1.3.4 *Fibras utilizadas em compósitos*

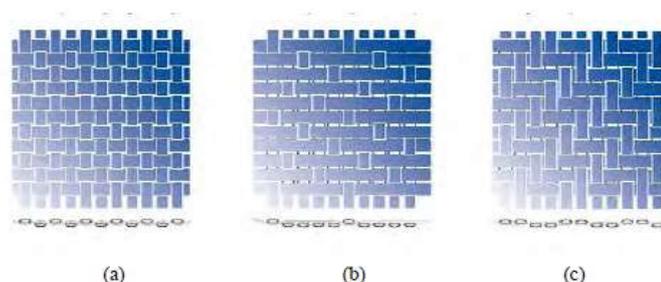
As propriedades estruturais de um compósito dependem primeiramente do tipo de reforço utilizado, da sua porcentagem em volume no material, da orientação da fibra e o quão efetivo o material é utilizado (MAY, 1988; SHACKELFORD, 2008). Tipicamente, o reforço é utilizado para conferir resistência aos esforços, ou seja, maiores valores de rigidez e de resistência à tração ao material. O reforço, no caso de compósitos estruturais, é constituído de fibras contínuas, as quais podem ser de diferentes tipos, por exemplo, fibras de vidro, carbono e aramida.

Reforços de mantas de fibras descontínuas têm as orientações das fibras dispostas aleatoriamente e são conhecidos como não tecidos. Alguns exemplos de não tecidos são: manta e tecido. Reforços com arranjo unidirecional e tecido bidirecional ± 45 graus, são os tipos de reforços normalmente utilizados na área de fabricação de pás para geradores eólicos.

A seleção dos tecidos de reforço utilizados na fabricação de pás de turbinas eólicas é historicamente focada em materiais utilizados na indústria naval (SAMBORSKY, 1999). Os reforços de fibra contínua podem ser classificados em dois tipos: os trançados (tecidos) e os costurados pelo arranjo de fitas unidirecionais e tecido biaxial.

Nos tecidos, uma mecha de fios passa uma sobre o outra, posicionando as mechas de fibras nas direções 0° (urdume) e 90° (trama). A configuração do arranjo dos cabos define vários tipos de tecidos, como ilustra a Figura 26. Nesta figura, observam-se três tipos diferentes de tecidos sem costura.

Figura 27 – Tecidos sem costura, denominados de (a) Plain Weave, (b) Satin Weave e (c) Twill Weave



Fonte: Hexcell (2009).

Pás fabricadas com resina epóxi éster vinílica e a palha da carnaúba com trama Plain Weave, reforço que permite maior número de pontos de contato obtendo um tecido mais forte que outras tramas de fios simples, o compósito apresentaram boas propriedades mecânicas e um bom acabamento. Antes da produção da pá observou-se a espessura da trama da palha a 45° e sua porcentagem em volume no material da resina, critério para impossibilitar a fabricação.

A orientação da fibra e o perfil muito fino não permitiu construir a trama a 45° em toda a pá. Medições com o paquímetro Figura 28 nas seções identificou que poderia ocorrer uma subárea próxima às bordas e ponta da pá o que levaria a fratura. A construção da pá ficou com a trama sem costura Plain Weave em todo o comprimento e uma segunda camada próxima à seção da raiz com trama 45° como ilustra a figura 27 reproduzida para o outro molde como ilustra a figura 28.

Figura 28 – Trama da palha da carnaúba Plain Weave



Fonte: Elaborada pelo autor.

A estrutura da pá construída com critério de 60% resina epóxi éster vinílica e 40% de reforço:

Figura 29 – Espessura da trama da palha da carnaúba Plain Weave



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura – 30 Modelamento da palha ao molde de infusão



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.4 *Processo de produção da pá*

Atualmente, existem muitos processos disponíveis para o processamento de compósitos termorrígidos. Os mais utilizados são: laminação manual ou hand lay up, infusão por vácuo (Vacuum Infusion Process, VIP), o Resin Transfer Moulding (RTM) e a laminação pelo uso de pré-impregnados.

Alguns processos são bem simples e envolvem pouca tecnologia e intenso trabalho manual, enquanto outros fazem uso de ferramentas sofisticadas e controles computacionais. No entanto, todas as técnicas de processamento possuem um ponto em comum, que é o uso de ferramentas, chamada de moldes, para manter o reforço na posição desejada enquanto a resina é curada obtendo o formato do molde na resina. O processamento de materiais compósitos necessita, ainda, de alguma maneira, do uso de algum artifício para forçar a migração da matriz polimérica para dentro do reforço (MASTEMBERG, 2004).

A fabricação de um compósito polimérico termorrígido, não importando o tipo de molde utilizado, é realizada em três etapas principais (Barros, 2006): adaptação do material de reforço ao molde, obtendo-se desse modo, a forma e dimensão desejada; impregnação do reforço pela matriz polimérica e cura da resina, com o enrijecimento do material compósito e desmoldagem final da peça.

A técnica de processamento escolhida neste estudo refere-se à infusão por vácuo (VIP), que é relativamente simples e com a vantagem de reduzir a emissão volátil, pois o processamento do compósito faz uso de moldes fechados. O uso de moldes fechados, optou-se pela fabricação em madeira Massaranduba de 1750mm x 200mm x 200mm com o pós

tratamento de impermeabilização da superfície de fechamento do molde permitindo o uso de vácuo entre os vasos com resina de um lado e um recipiente para acumular o excedente da resina do outro como ilustra a figura 30.

No caso desse estudo optou-se pela infusão por vácuo, e para manter o reforço de fibra ou da palha da Carnaúba, na posição do molde, o reforço já passou pelo modelamento manual com resina nos respectivos moldes superior e inferior. O espaço da pá no molde é ocupado pela resina que se encontra sob a influência do vácuo de (10mm de Hg) e pressão de (10 Psi) do outro, favorecendo, assim, a criação de um fluxo da matriz polimérica através do molde, com a conseqüente impregnação do reforço após a cura, à pá é retirada do molde usando espátulas de nylon e ar comprimido.

Figura 31 – processo de infusão da resina



Fonte: Adaptado pelo autor.

Nesse caso, o compósito apresenta uma distribuição mais homogênea fibra-resina, o tempo de processamento é menor que o verificado na laminação manual, além de promover um ambiente de trabalho mais limpo e menos agressivo à saúde.

O escoamento da resina na infusão é regido pelas leis de fenômeno de transporte para escoamento laminar, obedecendo a Lei de Darcy dada pela equação 15 (OWEN, 2000):

$$t = \frac{\eta \cdot l}{2 \cdot K \cdot P} \quad (18)$$

Onde:

t = é o tempo de preenchimento [s]

k = é a permeabilidade, ou porosidade da camada de tecido [m^2]

h = é a viscosidade da resina [mPa.s]

l = é a distância de escoamento [m], ou seja, o comprimento da camada de tecido

p = é diferença de pressão [Pa], mantida constante durante a infusão.

4.2 Forças aerodinâmicas na pá

4.2.1 *Uso de software para obter as forças normal e tangencial da pá*

Para obter o carregamento da pá, ensaio em túnel de vento seria necessário, porém as instituições de desenvolvimento e pesquisa e suas respectivas academias desenvolvem softwares para simulação de perfis aerodinâmicos com dados reais de túnel de vento em versão acadêmica. O programa computacional da NASA pode ser utilizado por estudantes para realizar simulação de perfis com velocidade de vento de $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ analisando cada seção da pá separadamente.

Os dados necessários para simulação no software FoilSimIII foram elaborados pelo autor na seção 3.4.2, os resultados obtidos nas tabelas 8, 9 e 10 do perfil E61 de comprimento 145mm de pá e 9mm de um perfil retangular com 10mm x45mm para fixação no aerogerador.

Resultado obtido com ângulo de ataque $\alpha = 5^\circ$.

Tabela 9 – Resultados do perfil E61 aplicado na pá

Ângulo de ataque	Câamber	Thickness
5°	6,7% c	5,7% c

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resultado obtido com velocidade do vento $3,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nas seções da pá.

Tabela 10 – Dados de entrada com velocidade do vento de $3.5m. s^{-1}$

Extensão (m)	Corda (m)	Area da seção (m ²)	Vento relativo (km/h)	Altura da torre (m)
0,145	0,194041394	0,021318001	18,68635	8
0,29	0,180277633	0,027138129	19,34161	8
0,435	0,145282282	0,023603094	25,68929	8
0,58	0,117850983	0,019077162	22,25381	8
0,725	0,098036934	0,015651874	22,33742	8
0,87	0,083518989	0,013162804	19,81939	8
1,015	0,072567785	0,011316291	28,13455	8
1,16	0,064067769	0,009906078	16,69171	8
1,305	0,05730309	0,008799387	24,02014	8
1,45	0,051803413	0,007910221	22,74933	8

Fonte: Elaborada pelo autor.

Carregamento da pá obtido pelo Software FoilSimIII e as Forças axiais e tangenciais calculadas pelas equações (13) e (14) da seção 2.1.5.3, estão na tabela 10.

Tabela 11 – Forças de Sustentação e arrasto obtidas pelo Software FoilSimIII

Extensão (m)	Força de sustentação (N)	Força de arrasto (N)	Força axial ao plano do rotor (N)	Força tang. ao plano do rotor (N)
0,145	0,347	0,149	0,118074825	0,358703688
0,29	0,46	0,199	0,272480479	0,420660657
0,435	0,575	0,247	0,621712558	0,071466741
0,58	0,44	0,189	0,244985205	0,41146476
0,725	0,361	0,155	0,304998164	0,247633035
0,87	0,232	0,1	0,219534051	0,125015201
1,015	0,408	0,175	0,275393433	0,348206055
1,16	0,128	0,055	0,056080348	0,127530367
1,305	0,233	0,1	0,241795407	0,076315012
1,45	0,189	0,081	0,190967979	0,076244548

Fonte: Elaborada pelo autor.

Norma de segurança IEC 61400-2 demonstra na tabela 11 o fator de incremento das forças aerodinâmicas.

Tabela 12 – Norma de segurança IEC 61400-2

Source of loading	Unfavourable loads						Favourable loads		
	Types of loading								
	Normal and extreme				Abnormal				
	IEC	GL	DS	IEC	GL and DS	IEC	GL	DS	
		Normal	Extreme						
Aerodynamic	1.35	1.2	1.5	1.3	1.1	1.0	0.9	-	
Operational	1.35	1.35	1.2	1.3	1.1	1.0	0.9	-	
Gravity	1.1*	1.1*	1.1*	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	
Inertia	1.25	1.1*	1.1*	1.0	1.1	1.0	0.9	1.0	

*Factor increased to 1.35 if masses are not determined by weighing.

Fonte: Adaptado da norma IEC 61400-2.

Resultado da aplicação na região rural do estado do Ceará com média anual de ventos de $3,5.m.s^{-1}$, a tabela 12 demonstra ventos em $(.m.s^{-1})$ de classe IV.

Tabela 13 – Classe de ventos de aerogeradores

Classe de Vento	I	II	III	IV
Velocidade de referência	50	42,5	37,5	30
Velocidade média anual	10	8,5	7,5	6
Rajada máxima de 50 anos	70	59,5	52,5	42
Rajada máxima de 10 anos	52,5	44,6	39,4	31,5

Fonte: adaptada pelo autor.

4.3 Produção de pás com reforço

Foram produzidas no laboratório de máquinas térmicas (LMT-IFCE) uma pá de resina epóxi e reforço de palha da carnaúba, outra com resina epóxi e tecido da fibra de vidro e uma terceira de resina poliéster com tecido da fibra de vidro.

5 DICUSSÃO DOS RESULTADOS

Uma maneira simples e eficaz de fazer pás para pequenas turbinas eólicas é cortar as lâminas de seções de metal ou tubo de PVC. O ângulo de torção e da lâmina pode ser controlado pela forma do corte e da curva do tubo aproxima-se de uma configuração de aerofólio. No entanto para a utilização do perfil E61 aplicado para baixo vento a espessura da parede não permitiu o processo simplificado de construção da pá.

É possível a construção de pás eólicas com uso de fibras vegetais de carnaúba como reforço, o uso das resinas poliéster ou epóxi assim como o tratamento para melhorar as propriedades físicas poderão ser desenvolvidos a partir de um dinamômetro apropriado que simule os carregamentos por seções permitindo identificar falhas pontuais direcionando os estudos para os pontos de falha, sejam no processo de fabricação ou do próprio material.

Só após uma nova pesquisa visando à segurança é possível substituir as pás dos aerogeradores comerciais por pás projetadas para o vento e condições climáticas do interior cearense.

O projeto da máquina de ensaios deve ser capaz de simular esforços na pá simulando as forças geradas pela energia extraída do vento. Essa máquina deve alçar os perfis nas distâncias respectivas das 10 seções do projeto da pá e tracionar no ângulo resultante das forças normal e tangencial.

Outra conclusão, deverá ser construído três pás para montar um rotor experimental com perfil e61, pás de 145mm de comprimento, cubo de 20mm para montar na torre e fixar as pás, instrumentar com anemômetro e um freio dinamométrico para obter o C_p do rotor, se constatar a eficiência tomar medidas para comercialização.

6 CONCLUSÃO

A fibra de carnaúba é viável tecnicamente para ser utilizada como reforço em compósito para produção de pás eólicas.

Foi obtido sucesso na modelagem aerodinâmica com o perfil E61 que é compatível com regimes de baixo vento.

Foi construído o molde de madeira, prática incomum em moldes e bem sucedida na usinagem e impermeabilização.

Foram produzidas três pás de diferentes resinas e reforços.

REFERÊNCIAS

AID. **Airfoil Investigation Database**.2011. Disponível em: <<http://ictaeolus.eu/about.html>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

ALBIERO, Daniel: **Turbina eólica para agricultura familiar do semiárido com inovações tecnológicas para baixas velocidades de vento**. - IX Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola - XLI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - 15 a 19 de julho de 2012 – Londrina, Paraná, Brasil.

ANCELOTTI JR., A. C. **Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono / resina epóxi**. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - ITA, São José dos Campos, 2006.

AWEA, U. S. Wind Industry Annual Market Report, Year Ending 2013. **American wind energy association, executive summary**, 2014.

BARROS, A. S.. **Estudo do desalinhamento das fibras nas propriedades mecânicas de compósitos estruturais de pás eólicas**. Tese de (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19%4080/2010/01.15.11.17/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2012.

BRABECK, S. SkySails–new energy for fishing trawlers. In: **First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency**. May, Vigo, Spain. 2010.

BRASILEIRO–CRESESB, Atlas do Potencial Eólico. CEPEL..

BREUKELS, J.; OCKELS, W. J. Tethered wing design for the Laddermill project. **Windtech international**, n. 8, p. 6-9, 2006.

BURTON, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. **Wind energy: handbook**. Ed. John Wiley & sons, Inglaterra, 2001.

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

BUNDESVERBAND WINDENERGIE. **Wind Energy Market. Klaine Analgen**. 2010a. Disponível em <http://www.wind-energy-market.com/de/nc/kleine-anlagen/list/sp/sort/turbine_type/sp-start/20/>. Acesso em: 20 jan.2013.

CALLISTER, W. D. Jr. **Materials science and engineering**. New York: John wiley □ Sons, 5ª edition, 2002. p. 520.

CARVALHO, L. F. M. **Fibras da Palha da Carnaúba: Caracterização e Aplicações em Compósitos**. 2004, 98f. Tese (Mestrado em Físico Química) – Universidade Federal do Piauí. Teresina, 2004.

CARVALHO, P., **Geração Eólica**. Ed. Imprensa Universitária, Fortaleza, Brasil, 2003.

CRESESB, CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. 2001

Centro de Referência para a Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito: CEPEL-CRESESB. **Tutorial Solar** Disponível em: <www.cresesb.cepel.br>. Acesso em: 22 abr. 2012.

- COSTA, M.L. **Estabelecimento de parâmetros de processamento de compósitos via análises térmicas e viscosimétrica**. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica)- ITA, São José dos Campos, 1998.
- COUTTS, R. S. P., WARDEN, P. G., “**Sisal pulp reinforced cement mortar**”, *Cement & Concrete Composites*, v. 14, pp. 17-21, 1992.
- ELLIS, B. **Chemistry and technology of epoxy resins**. 1ª edição. Londres. Black Academie & Professional. 1993. 332 p.
- FRANCO, L.A.L. **Análise fractográfica de compósitos poliméricos estruturais**. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica) - Ita, São José dos Campos, 2003.
- GASCH, R.. **Windkraftanlagen**. Teubner, 2007
- GERTHSEN, C. E.; VOGEL H.. **Physik**, Springer Verlag, 1993.
- HEXCELL. **Technical Data Sheet**. 2009. Disponível em: <<http://www.hexcell.com>>. Acesso em: 20 ago. 2013.
- HEXION. Infusion resin MGS RIM 135 (L135i). **Technical Data Sheet**. agosto, 2005. Disponível em: <<http://www.hexion.com>>. Acesso em: 20 ago. 2013.
- IBGE (Instituto Brasileiro Geográfico Estatístico). (2009), “**Produção da extração vegetal e da silvicultura**.” Rio de Janeiro, v. 24, pp. 1-45. ISSN 0103-8435.
- IEC - *International Electrotechnical Commission*. **NORM 61400-2:2006 – Design Requirements for Small Wind Turbines**. London, 2006.
- JURECZKO, MEZYK; PAWLAK, M.; MEŻYK, A. Optimisation of wind turbine blades. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 167, n. 2, p. 463-471, 2005.
- LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: Ciência e Tecnologia**, 1ª ed., Edgard Blucher, 2006.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wing energy explained**. West Sussex: Wiley, 2009. 705 p.
- MASTEMBERG, D.B. **Simulation and testing of resin infusion manufacturing processes for large composite structures**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Montana State University. Bozeman, 2004
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wing energy explained**. West Sussex: Wiley, 2009. 705 p.
- MAY, C. A. **Epoxy resins**. 2ª edição. New York: ed. Marcel Dekker, inc., 1988. 1242 p.
- MESQUITA, Roberto César Magalhães. **Seleção de genótipos superiores de carnaubeira (*Copernicia sp*)**. Formulário de projeto de pesquisa apresentado ao FUNDECI-ETENE-BNB, jan. 2005, Fortaleza, CE.

MUNSON, Bruce Roy; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore Hisao. **Fundamentals of fluid mechanics**. New York, 1990.

MORTENSEN, A. Concise **Encyclopedia of Composite Materials**. Switzerland. Elsevier Ltda., second edition, 2007.

MUNSON, Bruce Roy; YOUNG, Donald F.; OKIISHI, Theodore Hisao. **Fundamentals of fluid mechanics**. New York, 1990.

NETO, O. A. R. **Carnaubeira**.2004. Disponível em:
<<http://www.floresta.ufpr.br/~paisagem/plantas/carnaubeira.htm>> Acesso em: 12 Jul. 2013.

NOGUEIRA, C. L.; MARLET, J. M. F.; REZENDE, M.C. Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v 9, n 3, p 18-27, 1999.

OWEN, M.J.; MIDDLETON, V.; JONES, I.A. (Eds.). **Integrated design and manufacture using fibre-reinforced polymeric composites**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.

POLLICINO, F.. **Certification of Small Wind Turbines (SWT)**. Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, Business Segment Renewables, 2009-10-17, Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing.

Rott, N., “**Note on the history of the Reynolds number,**” Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 22, 1990, pp. 1–11.

SAMBORSKY, D. D.; MANDELL, J. F.; CAIRNS, D. S. Selection of reinforcing fabrics for wind turbine blades. **AIAA**. 1999. 11p. Disponível em: <<http://www.coe.montana.edu/composites/People/Publications/publications.htm>>. Acesso em: 15 ago. 2013

SHACKELFORD, J.F. **Introduction to materials science for engineers**. 7a edição, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 878 p.

SUN & WIND ENERGY 1/2010. **Small Turbines with big potential**. p.108, 2010. Disponível em: <http://www.fortiswindenergy.com/upload/images/swe_0110_108-115_windenergy_smallwindturbines.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2013.