



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DANIEL PAIXÃO DA SILVA

**DESEMPENHO AERODINÂMICO DAS PÁS DE UM AEROGERADOR DE
PEQUENO PORTE, PERFIL NREL S809, EM DIFERENTES VELOCIDADES
ESPECÍFICAS DE PROJETO.**

FORTALEZA

2012

DANIEL PAIXÃO DA SILVA

DESEMPENHO AERODINÂMICO DAS PÁS DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO
PORTE, PERFIL NREL S809, EM DIFERENTES VELOCIDADES ESPECÍFICAS DE
PROJETO.

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para obtenção do grau
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa
Rocha

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S579d Silva, Daniel Paixão da.
Desempenho aerodinâmico das pás de um aerogerador de pequeno porte, perfil NREL S809, em diferentes velocidades específicas de projeto. / Daniel Paixão da Silva. – 2012.
71 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2012.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Engenharia Mecânica. 2. Energia Eólica. 3. Aerogerador. I. Título.

CDD 620.1

DANIEL PAIXÃO DA SILVA

DESEMPENHO AERODINÂMICO DAS PÁS DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO
PORTE, PERFIL NREL S809, EM DIFERENTES VELOCIDADES ESPECÍFICAS DE
PROJETO.

Dissertação submetida à Coordenação do
Curso de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial para a obtenção do grau
de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovado em 31/08/2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^ª. Dra. Carla Freitas de Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

Dedico esse trabalho ao meu filho Pedro
Guilherme, cujo sorriso cura qualquer das
minhas aflições.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Carlos Alberto e Sandra que me deram todo o amor e suporte para estar escrevendo essas palavras. Aos meus avós Raimundo Nonato e Maria Batista (in memoriam).

À família que com a ajuda de Deus construí durante o período de mestrado, meu filho Pedro Guilherme (Babai), e minha esposa Clara Tainá que esteve sempre ao meu lado.

Ao meu professor e orientador Paulo Alexandre, pela experiência e conhecimentos transmitidos, paciência, simplicidade, grande senso de humor e com quem sempre pude abertamente expor uma opinião e trocar ideias mesmo em momentos de tensão.

Aos colegas de laboratório cujo apoio foi de fundamental importância para a conclusão desse trabalho, Maurício, Welbson, Felipe, Peixoto, Diego, Danilo, João Vitor, dentre inúmeros outros que não citei, mas souberam o quão penoso foi levantar ou baixar as torres de apoio das pás ou fazer qualquer ajuste no aparato de medição. Ao Valdi da coordenação da pós-graduação.

A todos que acreditam que o conhecimento só deve tornar as pessoas mais simples.

RESUMO

As pás de um aerogerador são o componente de importância mais direta na transformação da energia cinética dos ventos em energia de rotação. As pás têm como princípio de funcionamento a ação de forças aerodinâmicas em seus perfis, que produzem um torque no eixo de rotação, que é captado por um gerador elétrico e assim o transformando em energia elétrica. Neste processo de transformação da energia há perdas tanto mecânicas quanto elétricas e dessa forma as pás devem ser projetadas de maneira a serem o mais eficientes no regime de operação para o qual foram projetadas. O presente trabalho se propôs a realizar testes de desempenho aerodinâmico de um conjunto pás de um aerogerador de pequeno porte, com raio de 1,5m, utilizando aerofólio NREL S809 e projetadas através da Teoria do Momento do Elemento de Pá (BEM). Os resultados dos testes, expressos por curvas características, mostraram que dentre as pás testadas, a $\lambda=7$ apresentou o melhor desempenho, obtendo um valor de $C_{pmax}=0,31$.

Palavras-chave: Energia eólica. BEM. Desempenho aerodinâmico.

ABSTRACT

The blades of a wind turbine are the direct component in the conversion of the kinetic energy of the wind into rotational energy. The blades have the operating principle based on the action of aerodynamic forces on their profiles, producing a torque on the axis of rotation, which is captured by a generator and thus transformed into electrical energy. In the energy conversion process there are both mechanical and electrical losses and by that the blades must be designed to be the most efficient in the operating regime where they are used. The present work aims at testing the aerodynamic performance of a set of turbine blades, 1.5 m radius, using NREL S809 airfoil and designed based on the Blade Element Momentum Theory (BEM). The results, expressed by the characteristic curves showed that among the tested blades, $\lambda = 7$ had the best performance, obtaining a value of $C_{p_{\max}} = 0.31$.

Keywords: Wind Energy; BEM; Aerodynamic performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1-	Ar atravessando a área varrida por um rotor.....	25
Figura 4.2-	Forças aerodinâmicas na pá de um rotor.....	25
Figura 4.3-	Cone de Expansão.....	26
Figura 4.4-	Parâmetros C_P e C_T de uma turbina ideal em função do fator de indução axial.....	30
Figura 4.5-	Trajetória do ar ao atravessar o disco rotor.....	32
Figura 4.6-	Ganho de velocidade tangencial na espessura do disco.....	32
Figura 4.7-	Seção anelar de um rotor com três pá.....	33
Figura 4.8-	Coefficiente de potência em função da relação de velocidade de ponta.....	37
Figura 4.9-	Pá dividida em seções (elementos de pá).....	38
Figura 4.10-	Velocidades e forças em cada elemento da pá.....	38
Figura 4.11-	Coefficiente de empuxo.....	43
Figura 4.12-	Comparação teórica experimental de C_T	44
Figura 4.13-	Curva de potência de uma turbina de eixo horizontal.....	45
Figura 5.1-	Perfil NREL S809.....	50
Figura 5.2-	Transdutor de torque T22HBM. (www.hbm.com).....	51
Figura 5.3-	Tacômetro digital, modelo TS-TADIG.....	52
Figura 5.4-	Sinais ultrassônicos anemômetro. (Windmaster-pro-manual).....	52
Figura 5.5-	WinMaster 1590-PK-20 (www.omniinstruments.co.uk).....	54
Figura 5.6-	Conversor e Data logger.....	54
Figura 5.7-	Blocos desmontáveis e base da torre. (Lopes, 2011).....	54
Figura 5.8-	Posicionamento do transdutor de torque e sensor do tacômetro.....	55
Figura 5.9-	Torre, fiação e alavanca de acionamento manual do freio.....	55
Figura 5.10-	Cubo e acoplamento das pás.....	56
Figura 5.11-	Veleta de direcionamento do eixo do rotor.....	56
Figura 5.12-	Torre do anemômetro.....	57
Figura 5.13-	Diagrama esquemático da conexão dos instrumentos.....	58
Figura 5.14-	Local dos testes.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 6.1- Curvas de afilamento e torção das pás.....	61
Gráfico 6.2- Curvas de nuvem, C_p versus λ	62
Gráfico 6.3- Curvas de Torque versus λ	63
Gráfico 6.4- Curvas de Potência versus λ	64
Gráfico 6.5- Curvas de C_p versus λ	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características do vento nos testes.....	62
Tabela 2- Geometria da pá $\lambda=6$	68
Tabela 3- Geometria da pá $\lambda=7$	69
Tabela 4- Geometria da pá $\lambda=8$	69
Tabela 5- Geometria da pá $\lambda=9$	70
Tabela 6- Tratamento dos dados $\lambda=6$	70
Tabela 7- Tratamento dos dados $\lambda=7$	71
Tabela 8- Tratamento dos dados $\lambda=8$	71
Tabela 9- Tratamento dos dados $\lambda=9$	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

NREL	National Renewable Energy Laboratory
BEM	<i>Blade Element Momentum</i>
TSR	<i>Tip Speed Ratio</i>
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Fator de indução axial
$a_{Glauert}$	Fator de indução axial de Glauert
a'	Fator de indução tangencial
A_∞	Área do cone de expansão a montante do aerogerador
A_d	Área do disco do rotor
A_w	Área do cone de expansão a jusante do aerogerador
c	Corda do elemento de pá
C_d	Coefficiente de arrasto de um perfil aerodinâmico
C_l	Coefficiente de sustentação de um perfil aerodinâmico
C_x	Coefficiente de força normal
C_y	Coefficiente de força tangencial
C_p	Coefficiente de potência
C_t	Coefficiente de empuxo
D	Força de arrasto
L	Força de sustentação
dQ	Elemento diferencial de torque
dT	Elemento diferencial de empuxo
N	Número de pás
E_c	Energia cinética
P	Potência eólica
P_d^+	Pressão máxima no plano do rotor do aerogerador
P_∞	Pressão da zona não afetada pelo aerogerador
P_d^-	Pressão mínima no plano do rotor do aerogerador
Q	Torque tangencial
r	Posição radial ao longo da pá
R	Raio do rotor
T	Empuxo
U_∞	Velocidade do vento a montante do aerogerador
U_d	Velocidade do vento no plano do rotor do aerogerador
U_w	Velocidade do vento a jusante do aerogerador
W	Velocidade relativa incidente no elemento da pá

α	Ângulo de ataque
β	Ângulo de torção da pá
σ'	Solidez local
σ	Solidez
λ	Razão de velocidade de ponta de pá (TSR)
μ	Posição radial adimensional
ρ	Densidade do fluido
φ	Ângulo de incidência do vento no elemento de pá
Ω	Velocidade angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO GERAL.....	18
2.1	Objetivo Específico.....	18
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
4.1	Aerodinâmica de turbinas eólicas de eixo horizontal.....	24
4.2	Teoria do momento do elemento de pá – BEM.....	38
4.3	Geometria da pá para uma velocidade de operação variável	47
5	METODOLOGIA	51
5.1	Dimensionamento e características gerais das pás	51
5.2	Aparatos de medição	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
7	CONCLUSÃO	67
8	REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS	68
9	ANEXO A - VALORES NUMÉRICOS DA GEOMETRIA DAS PÁS.....	68
10	ANEXO B - TRATAMENTO DE DADOS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Historicamente, pode-se dizer que a Revolução Industrial marca o início de um processo de transformações progressivas em diversas áreas de nossa sociedade, seja na economia, na tecnologia ou no meio ambiente. As causas e consequências da mudança global do clima estão fortemente ligadas a estas transformações.

O advento das máquinas a vapor, especificamente, marca o início de um aumento acelerado do consumo de combustíveis fósseis. A utilização, cada vez maior, de derivados do petróleo como fonte energética para iluminação, em motores de combustão e em diversas outras áreas foi se intensificando. O carvão mineral tornava-se então o principal combustível das novas máquinas, cuja utilização cresceria de forma vertiginosa ao longo do século XIX. A vida moderna se tornou movida à custa de recursos esgotáveis que levaram milhões de anos para se formar. O uso desses combustíveis em larga escala tem mudado substancialmente a composição da atmosfera e o balanço térmico do planeta provocando o aquecimento global, de gelo nos pólos, chuvas ácidas e envenenamento da atmosfera e todo meio-ambiente. As previsões dos efeitos decorrentes para um futuro próximo são catastróficas.

À medida que se intensificaram o consumo e dependência dos combustíveis fósseis cresceram também a preocupação relativa a dois problemas. Primeiro, a preocupação quanto a questões de ordem ambiental e seus efeitos, e segundo o fato preocupante de, além de serem danosos, os combustíveis fósseis são finitos, ou seja, esgotáveis.

A saída para essa problemática foi a utilização de fontes renováveis de energia, que surgiram como uma alternativa para o futuro e para o momento como complemento às fontes convencionais de energia. Diz-se que uma fonte de energia é renovável quando não é possível estabelecer um fim temporal para a sua utilização. É o caso da energia proveniente do sol, que indiretamente acarreta existência dos ventos como recurso energético, das marés ou dos cursos de água, e de maneira geral é o que promove a manutenção da vida em todos os níveis. Cabe então à sociedade desenvolver tecnologias para o aproveitamento eficiente das fontes renováveis existentes.

No presente trabalho, abordou-se a energia eólica como a fonte renovável de energia com atenção aos fenômenos e processos que influenciam e determinam o desenvolvimento de equipamentos utilizados na extração da energia proveniente dos ventos.

O fator determinante na operação e eficiência de geradores eólicos é o estudo aerodinâmico de sua estrutura onde os efeitos ainda não completamente compreendidos limitam a eficiência dos mesmos. A parte mecânica da extração da energia dos ventos foi abordada no trabalho, tendo como foco principal o estudo aerodinâmico em operação de um dos principais componentes de um aerogerador, que são as pás.

2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar o teste de campo de um conjunto de pás de aerogeradores de pequeno porte. Para tanto, utilizou-se um aparato experimental previamente construído por graduandos e mestrandos do grupo de aerodinâmica do DEMP/ UFC, o LAERO.

2.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos o trabalho se propôs a:

- Projetar e construir as pás utilizando por base o BEM;
- Montar o aparato experimental para realização dos testes;
- Realizar a coleta dos dados de campo;
- Formatar e analisar os dados obtidos e discutir os resultados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo estão apresentados trabalhos que abordam temas referentes à construção e testes de desempenho de turbinas eólicas, que é o tema principal do presente trabalho.

Com a finalidade de analisar o desempenho aerodinâmico e estrutural de aerogeradores de pequeno porte, Habalie e Saleh (1994), projetaram, construíram e testaram um aerogerador com pás de comprimento maiores do que 5m. As pás foram construídas com a característica de utilizarem dois perfis aerodinâmicos em uma mesma pá. Dois terços de cada pá, medidos a partir da raiz, utilizaram o perfil NACA 63-621 e o restante até a ponta da pá utilizou o perfil FX 66-S-196. Os perfis foram escolhidos tanto pela junção de suas características, que teoricamente contribuem para a otimização de desempenho, quanto pela semelhança, que facilita a construção da transição entre os dois perfis ao longo da pá. O perfil NACA 63-621 fornece um baixo C_{lmax} o que ajuda a controlar os picos de potência, porém esta característica é desejável apenas na região de ponta de pá. Perfis LS-1 têm comportamento oposto, e por essa razão o perfil FX 66-S-196, que possui características semelhantes ao perfil LS-1 foi escolhido para a da região externa da pá. Os testes de campo indicaram que a pá construída fornecia um valor de 41,2% para o coeficiente de potência médio e apresentava uma resistência estrutural de dez vezes a carga usual de operação.

Apadopoulos *et al.* (1995) realizaram um estudo da esteira de turbulência formada próxima às pás de um aerogerador numa zona distando um diâmetro de rotor do aerogerador. A turbina foi testada em um parque eólico localizado na ilha de Samos na Grécia, tendo as pás posicionadas a uma altura de 400m acima do nível do mar. Os dados experimentais foram coletados sob condição de vento forte, sendo as propriedades do campo de escoamento analisadas de forma integral e espectral. Os resultados mostraram que o campo turbulento varia radialmente, tendo uma forte dependência da velocidade do vento. O aumento dos níveis de turbulência foram observados próximos à ponta da pá e na altura do cubo para todos os valores de velocidade analisados. A análise espectral revelou um decréscimo da turbulência para frequências médias devido à redução das tensões associadas ao perfil de velocidade radial, o mesmo ocorrendo para energia cinética turbulenta para baixas frequências. O comportamento oposto foi observado para altas frequências com o consequente aumento da energia cinética turbulenta.

Aerogeradores de pequeno porte geralmente operam com alta razão de velocidade de ponta, definida como a razão entre a velocidade linear na ponta da pá e a velocidade do vento incidente. Operando sob este regime o desempenho do aerogerador é afetado devido à influência dos efeitos de compressibilidade do ar. Visando o entendimento desta questão Wood (1996), baseando-se em um extenso banco de dados fornecido pela NASA, realizou um estudo numérico de tais efeitos para um perfil NACA0012. O perfil foi analisado sob diferentes valores do número de Mach e o comportamento dos coeficientes de sustentação e arrasto, bem como o efeito de descolamento do escoamento na pá foi discutido. Os resultados mostraram que inicialmente o coeficiente de sustentação aumenta com o número de Mach, enquanto isso o coeficiente de arrasto, o valor de pico da razão sustentação por arrasto e o ângulo no qual isso ocorre decrescem. Dentro do intervalo de valores de velocidade considerados, a discussão indicou como valor ótimo para a razão de velocidade de ponta no caso incompressível o valor $\lambda=9$. Concluiu-se também que o valor da velocidade do vento teria de ser da ordem de 30m/s para que houvesse redução significativa do desempenho do aerogerador.

Whale *et al.* (1997) investigaram o comportamento de vórtices de turbulência formados na esteira a jusante de um aerogerador usando um modelo em escala, com a utilização de um PIV (*Particle Image Velocimetry*). O modelo representado em escala simula um aerogerador do tipo bipá com razão de velocidade de ponta variando de 3 a 8. As medidas das variáveis do escoamento foram expressas por um campo bidimensional em seções radiais ao plano do rotor. Para efeito de verificação os resultados foram comparados com valores obtidos utilizando um ROVLM (*Rotor Vortex Lattice Method*), um código computacional primeiramente desenvolvido na universidade de Stuttgart. Os resultados, apesar de não concordarem em número de Reynolds, indicaram que o modelo e a simulação estão de acordo qualitativamente ao comportamento de contração e expansão da esteira, e o modelo revela as características básicas dos vórtices formados na esteira.

Ebert e Wood (1998) realizaram um estudo experimental dos efeitos do escoamento turbulento formado por um aerogerador modelo bipá, perfil NACA4418, com corda constante e sujeito a três condições de operação determinadas pelo valor da razão de velocidade de ponta. Os valores experimentais foram coletados utilizando um anemômetro de fio quente disposto em seis locais e em duas posições na corda. Os dados incluíam valores médios de velocidade e tensões de Reynolds que, por conseguinte, serviram para a estimativa dos valores de vorticidade, baseando-se no método das diferenças finitas. Para o valor mais baixo de λ , com valores altos de ângulo de ataque, os resultados mostraram uma forte

evidência de separação do escoamento devido a altos valores de energia cinética turbulenta. O valor mais alto do coeficiente de potência C_p foi verificado para o valor intermediário de λ , observando-se também uma constância do valor de defeito de velocidade na direção radial e próxima ao rotor. No regime de operação intermediário, conforme o esperado resultou a mais simples estrutura de esteira comparada às outras condições de operação, visto que operava próximo ao seu valor ótimo. Para o valor de λ mais alto obteve-se um significativo decréscimo do coeficiente de potência, mostrando o alto efeito de perda na ponta das pás, cujos vórtices atuam no sentido de reduzir a potência energética extraída do vento.

Projeto e desenvolvimento de aerogeradores são baseados em teorias simples como BEMT (*Blade Element Momentum Theory*) em duas dimensões. Pesquisas de campo têm mostrado uma discrepância entre valores experimentais coletados em testes de desempenho e valores preditos pela teoria existente, devendo isso ao fato de ser desconsiderado o efeito do giro das pás na análise. Du e Selig (1999) desenvolveram um estudo sobre o efeito do giro do rotor sobre a estrutura da camada limite nas pás de um aerogerador. Os efeitos da rotação foram investigados considerando as equações integrais do momento para camada limite em três dimensões e a modelagem da camada limite turbulenta. Parâmetros chave como posição de descolamento e espessura da camada limite foram calculados para o caso da pá com e sem rotação. Os resultados mostraram que há um atraso no ponto de separação particularmente na metade interna da pá, efeito este que provoca um resultado benéfico por implicar em um maior coeficiente de sustentação e menor arraste comparado à teoria em duas dimensões. Mostrou-se também a importância das forças inerciais, centrífuga e de Coriolis no atraso do ponto de separação.

Ubaldi e Zunino (2000) realizaram um estudo acerca dos resultados experimentais que caracterizavam a estrutura transiente em um regime turbulento nas pás de um aerogerador. Os dados experimentais foram coletados com a utilização de um LDV (*Laser Doppler Velocimeter*) em conjunto com anemômetro de fio quente que permitiram decompor os valores das propriedades em valores médios, periódicos e contribuições aleatórias. Os resultados mostraram que as estruturas de fluxo periódico estavam qualitativamente de acordo com Well e Coles (1983), mostrando uma estrutura similar à esteira formada por um cilindro. Tensões de cisalhamento associadas aos movimentos periódicos em larga escala produziam fluxo de momento da periferia em direção à esteira. Tensões normais associadas às flutuações aleatórias apresentaram valores altos e decaíram mais lentamente no sentido do escoamento do ar incidente, comparado às tensões normais associadas a movimentos periódicos em larga

escala, porém na região próxima ao rotor as duas contribuições são comparáveis e isso deve ser levado em conta no balanço da equação do momento médio.

Visando analisar o comportamento de uma turbina eólica quando sujeita a alta intensidade de turbulência, Devinant *et al.*, (2002) utilizaram um túnel de vento para montar um banco de dados de propriedades aerodinâmicas relevantes no desempenho de um aerogerador. O perfil utilizado foi o NACA 654-421, submetido a intensidade de turbulência variando de 0,5% a 16%, ângulo de ataque de -10^0 a 90^0 e número de Reynolds no intervalo de 100.000 a 500.000. Os testes conduzidos simulam bem os níveis de turbulência característicos encontradas em baixas camadas da atmosfera e em esteiras geradas por aerogeradores posicionados próximos um do outro. Os resultados mostraram que o comportamento aerodinâmico de um aerogerador é extremamente influenciado, seja de forma qualitativa ou quantitativa, pela intensidade de turbulência a qual está sujeito. Este efeito é especialmente evidenciado no domínio dos ângulos de ataque para os quais há o descolamento da camada limite, que está intimamente ligado ao comportamento dos coeficientes de arrasto e sustentação no perfil. As propriedades aerodinâmicas do perfil apresentaram diferenças significativas em cada estágio em que se dividia o processo de descolamento da camada limite e ponto de separação.

Boa parte dos aerogeradores de pequeno porte é instalada onde a extração de energia é necessária e não onde as condições de vento são as melhores encontradas. Para que tais turbinas eólicas possam extrair a máxima potência do vento é importante que as pás iniciem a rotação na mais baixa velocidade possível. Com vistas a analisar o desempenho quanto ao torque de partida, Wright e Wood (2004) realizaram teste de campo de um aerogerador de pequeno porte, com rotor de 2m de diâmetro, e utilizaram para efeitos de comparação resultados teóricos obtidos pela teoria do elemento de pá. Os testes indicaram o início da rotação das pás a 4,6m/s em média, tendo valores reais uma faixa de variação de 2,5m/s a 7m/s. Dada a incerteza relacionada às predições teóricas de sustentação e arraste para altos ângulos de ataque e baixo número de Reynolds os resultados concordavam bem em 160 medidas de aceleração do rotor realizadas para a faixa de variação da velocidade de vento. Foi verificada também a validade teórica da predição de alta contribuição do torque de partida na região do cubo e maior torque extraído na região da ponta da pá.

Hu *et al.* (2005) Realizaram um estudo do atraso do descolamento da camada limite quando se compara a teoria BEM para o caso estático em 2D e o caso da pá girando em 3D. Para isso empregou-se a equação integral da camada limite em três dimensões, simulação

numérica usando código em CFD e teste experimental em túnel de vento. Os resultados mostraram que na raiz da pá, onde se tem um alto ângulo de ataque, os efeitos das forças inerciais de Coriolis e centrífuga quanto ao ponto de descolamento é bastante intenso comparado ao efeito do número de Reynolds e à medida que se afasta da raiz o comportamento se inverte. A relação entre posição de separação e posição radial ao longo da pá mostra resultados semelhantes nas duas abordagens, em duas dimensões e em três dimensões na região da ponta da pá. As forças inerciais atuam de forma a gerar um gradiente de pressão que favorece o atraso do ponto de descolamento para um ponto mais próximo do bordo de fuga.

Kasmi e Masson (2008) desenvolveram uma extensão do modelo $k-\varepsilon$ para escoamento turbulento através de uma turbina eólica. A modelagem usa como princípio a adição de um termo extra nas equações de transporte relacionado à dissipação turbulenta. O termo tem papel na transferência de energia das grandes escalas para pequenas escalas de turbulência na região próxima ao rotor. O trabalho apresentou simulações que visavam à comparação entre o modelo $k-\varepsilon$ existente e o modelo estendido a partir de resultados experimentais obtidos em testes de três turbinas eólicas. Os testes utilizaram um aerogerador modelo tripá Nibe-B 630-kW, um modelo bipá NASA/DOE Mod-0A 100-kW e um modelo tripá Danwin 180-kW, onde cada gerador foi submetido a um específico nível de turbulência. Os resultados obtidos indicavam uma melhor concordância do modelo estendido frente aos resultados experimentais quando comparado ao modelo $k-\varepsilon$ existente. A modelagem proposta se mostrou bastante eficiente principalmente em zonas onde há altas taxas de produção de energia cinética turbulenta.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Aerodinâmica de turbinas eólicas de eixo horizontal

Uma turbina eólica ou aerogerador é um dispositivo capaz de transformar energia cinética proveniente do vento em energia de rotação, e, por conseguinte, em energia elétrica.

A energia disponível para a transformação ou potencial eólico pode ser deduzida a partir de alguns argumentos simples a respeito do vento.

Dada uma massa m de ar se movendo com velocidade de translação v , como se sabe a energia cinética é escrita como,

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

A taxa com que a energia cinética flui através de uma dada área A , assim como qualquer outra quantidade é dada pelo produto de sua densidade, componente de velocidade na direção da área e a área. Supondo a velocidade do ar e área estando em uma mesma direção pode-se escrever:

$$P = \rho_{E_c} vA$$

Sendo ρ_{E_c} a densidade de energia cinética. Assim, o fluxo de energia cinética ou potência eólica pode ser dado por,

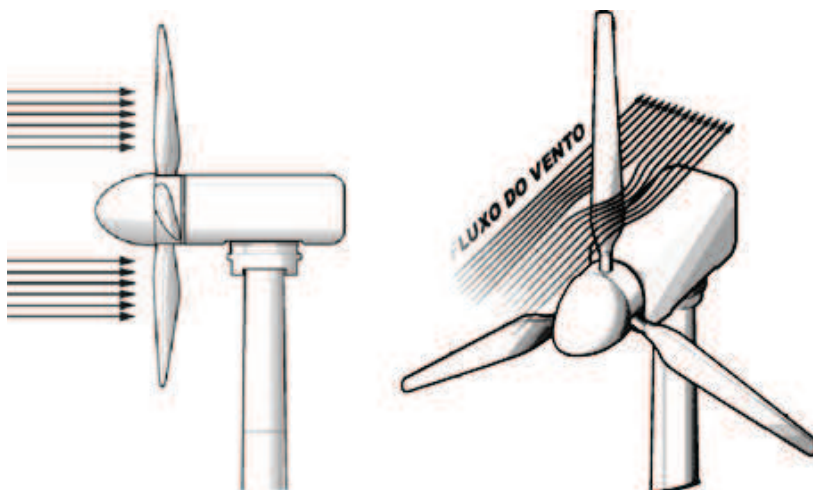
$$P = \frac{1}{2}\rho v^3 A$$

Pode-se dizer que:

- A potência eólica disponível é proporcional a ρ , densidade do ar. Nas condições padrão $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$.

- A potência eólica é bastante sensível à velocidade do vento, sendo proporcional ao cubo da velocidade do ar. Se a velocidade do vento é dobrada a potência disponível é multiplicada por oito.

Figura 4.1 – Ar atravessando a área varrida por um rotor.

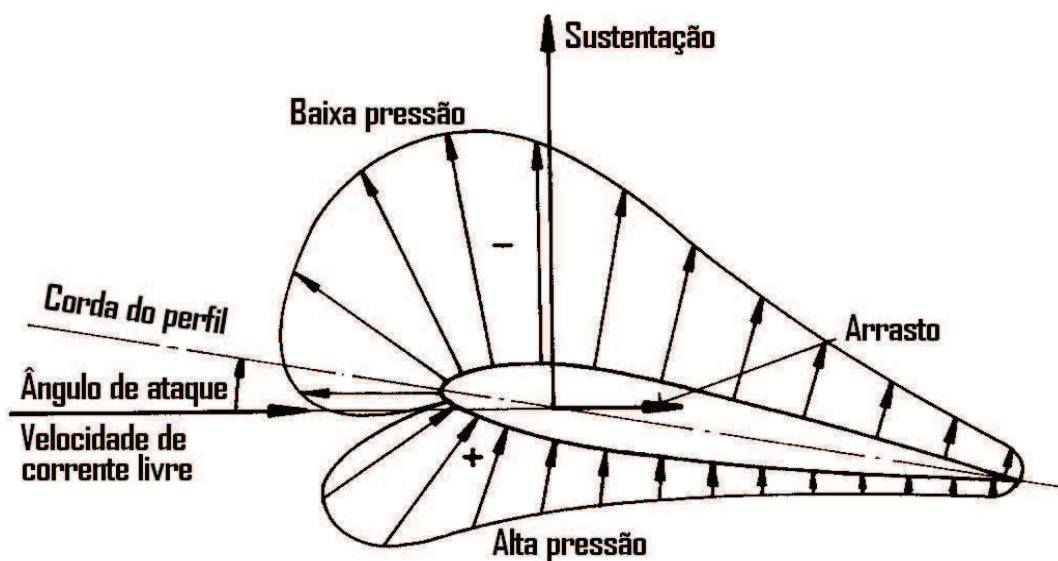


Fonte: (HOW STUFF WORKS)

O rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos. Em uma turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) este é posicionado de maneira que o seu eixo é paralelo à direção do vento, ver figura 4.1.

Os rotores são compostos pelas pás, eixo e engrenagens para transmissão do movimento de rotação para o gerador. As pás são o principal objeto de estudo de um aerogerador e giram por efeito das forças aerodinâmicas de sustentação e arrasto, figura 4.2.

Figura 4.2 – Forças aerodinâmicas na pá de um rotor.



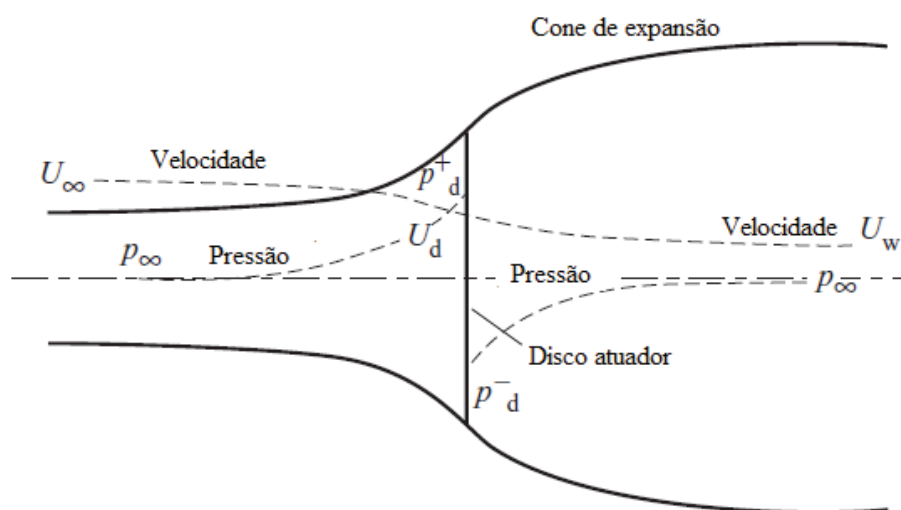
Fonte: (HANSEN, 2008)

Os aerogeradores modernos utilizam predominantemente as forças de sustentação para adquirir o torque necessário à rotação, pois permitem atingir uma eficiência bem maior comparada à utilização das forças de arrasto. As seções seguintes fazem uma abordagem das principais teorias acerca do funcionamento, eficiência, e aerodinâmica de turbinas eólicas de eixo horizontal.

4.1.1. Teoria do disco atuador e o limite de Betz

Um modelo simples, atribuído a Betz (1926), pode ser usado para analisar o funcionamento e a potência extraída por um rotor ideal. A análise assume um volume de controle cujas fronteiras são as superfícies de um tubo (linhas de corrente) de corrente. A turbina é representada por um disco de hélice idealizado, disco atuador, que cria uma descontinuidade da pressão do ar que escoa através do tubo de corrente, e possui como função extrair energia cinética do vento, ver figura 4.3.

Figura 4.3 - Cone de Expansão



Fonte: (BURTON *et. al.*, 2001)

O ar entra no cone de expansão vindo de uma região a montante do gerador, com velocidade (U_∞) e pressão ambiente (p_∞), ao se aproximar do plano do rotor a pressão do ar sofre uma elevação, tendo sua velocidade sofrido um decréscimo sem que haja descontinuidade, ver figura 4.3. Na região a jusante do disco, a pressão, inicialmente abaixo da pressão ambiente, volta a subir lentamente ao longo da esteira. Considerando o escoamento em regime permanente e não havendo interação com o ar fora do volume de controle pode-se escrever:

$$\rho A_{\infty} U_{\infty} = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \quad (4.1)$$

Onde ρ é a densidade do ar, A é a área transversal e U é a velocidade do escoamento. O símbolo ∞ refere-se à posições muito a montante, d refere-se a posições no disco e w (*wake*) refere-se a posições distantes da esteira.

Pode-se determinar as pressões p_d^+ a montante e a p_d^- a jusante do disco aplicando a equação de Bernoulli separadamente em duas regiões distintas. Assumindo o escoamento incompressível e desconsiderando alteração da energia potencial gravitacional da massa de ar, no tubo de corrente a montante do disco, escreve-se:

$$p_{\infty} + \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 = p_d^+ + \frac{1}{2} \rho U_d^2 \quad (4.2)$$

Na região a jusante:

$$p_d^- + \frac{1}{2} \rho U_d^2 = p_w + \frac{1}{2} \rho U_w^2 \quad (4.3)$$

Considerando que muito a montante e muito a jusante do disco tem-se ($p_{\infty} = p_w$), o empuxo T sobre o disco atuador poderá ser expresso como um somatório de forças:

$$T = A_d (p_d^+ - p_d^-) \quad (4.4)$$

Igualando $p_{\infty} = p_w$ nas equações (4.2) e (4.3) tem-se:

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2} \rho (U_{\infty}^2 - U_w^2) \quad (4.5)$$

Reescrevendo a expressão para o empuxo:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_d (U_\infty^2 - U_w^2) \quad (4.6)$$

A velocidade do ar na posição do disco pode também ser obtida a partir da igualdade das equações e considerando a vazão mássica $\rho A_d U_d$.

$$U_d = \frac{U_\infty + U_w}{2} \quad (4.7)$$

Assim, a velocidade do vento no plano do rotor é a média das velocidades do vento a montante e a jusante. O disco atuador influencia a velocidade de escoamento a jusante logo antes do rotor, e tal influência é escrita em função de um parâmetro nomeado fator de indução axial.

$$a = \frac{U_\infty - U_d}{U_\infty} \quad (4.8)$$

O fator de indução axial, “ a ”, é definido como a fração de redução da velocidade de escoamento da corrente livre ao chegar no plano do rotor. Dito de outra forma, o disco atuador induz uma velocidade que se superpõe à velocidade de corrente livre. A velocidade de escoamento no disco fica dessa forma escrita como:

$$U_w = U_\infty \cdot (1 - a) \quad (4.9)$$

Das equações (4.6), (4.7) e (4.9) pode-se também escrever:

$$U_w = U_\infty \cdot (1 - 2a) \quad (4.10)$$

Assim, metade da velocidade de corrente livre é reduzida no disco e outra metade a jusante.

4.1.2. Teoria do Momento

O ar que passa através do disco atuador sofre uma variação de velocidade em módulo $U_\infty - U_w$. Pode-se então equacionar o empuxo sobre o rotor como a taxa de variação do momento linear da massa em escoamento. Considerando também que o único responsável pela alteração do momento linear sobre o rotor seja a diferença de pressão, dessa forma:

$$(p_d^+ - p_d^-) A_d = (U_\infty - U_w) \dot{m} \quad (4.11)$$

Reescrevendo (4.11) em função do fator de indução axial.

$$T = (p_d^+ - p_d^-) A_d = 2\rho A_d U_\infty^2 a(1-a) \quad (4.12)$$

Como a força escrita pela equação (4.12) segundo a teoria é concentrada no disco atuador, pode-se então determinar a taxa com que a energia cinética do ar é extraída pelo rotor. Multiplicando o empuxo no rotor pela velocidade, obtém-se a potência extraída P:

$$P = 2\rho A_d U_\infty^3 a(1-a)^2 \quad (4.13)$$

Usualmente, caracteriza-se o desempenho do rotor de uma turbina eólica a partir do seu coeficiente de potência, C_P , que por definição representa a fração da energia incidente que é extraída pelo rotor.

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 A_d} = 4a(1-a)^2 \quad (4.14)$$

O máximo valor teórico do coeficiente de potência, conhecido como limite de Betz pode ser obtido fazendo:

$$\frac{dC_P}{da} = 4(1-a)(1-3a) = 0 \quad (4.15)$$

Obtem-se o valor de $a = 1/3$. Assim o C_P máximo é escrito como:

$$C_{P_{\max}} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \quad (4.16)$$

Até os dias atuais nenhuma turbina desenvolvida foi capaz de ultrapassar este limite. As turbinas eólicas modernas obtêm na prática coeficientes de potência na ordem de 0,47. (BURTON *et al.*, 2001).

A força no disco atuador, equação (4.12) pode ser adimensionalizada definindo-se um novo parâmetro que usualmente é analisado, conhecido como coeficiente de empuxo C_T .

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 A_d} \quad (4.17)$$

$$C_T = 4a(1-a) \quad (4.18)$$

O termo no denominador representa a força exercida pelo ar devido a uma força de pressão dinâmica na área do disco atuador.

A figura 4.4 ilustra graficamente os Coeficientes de potência C_P e de Empuxo C_T .

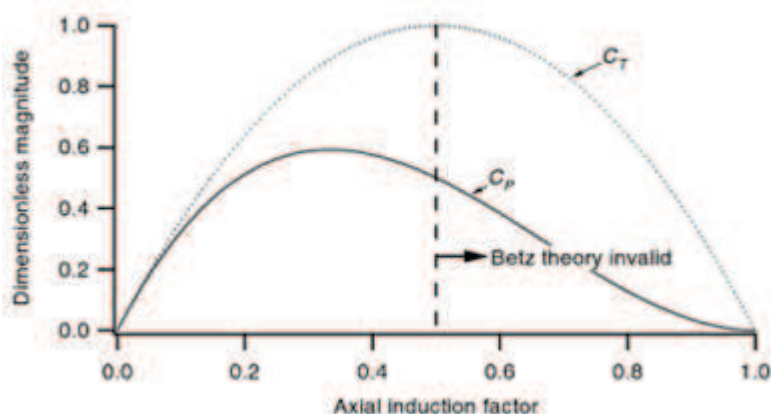


Figura 4.4 – Parâmetros C_P e C_T de uma turbina ideal em função do fator de indução axial. (MANWELL *et al.*, 2006)

Observe que caso se tenha $a \geq 1/2$ o termo de velocidade a jusante dado pela equação (4.10) se torna nulo ou até negativo, nessas condições a teoria do momento não mais se aplica e modificações tendo por base relações empíricas devem ser feitas.

Por fim, vê-se que a teoria do disco atuador combinada com a do momento fornecem, dentro de certos limites, uma base matemática para deduções e estimativas de desempenho de uma turbina eólica, obtendo-se um limite teórico, limite de Betz, para a potência extraída por um rotor. Pode-se resumir alguns fatores que na prática limitam a obtenção de tal limite:

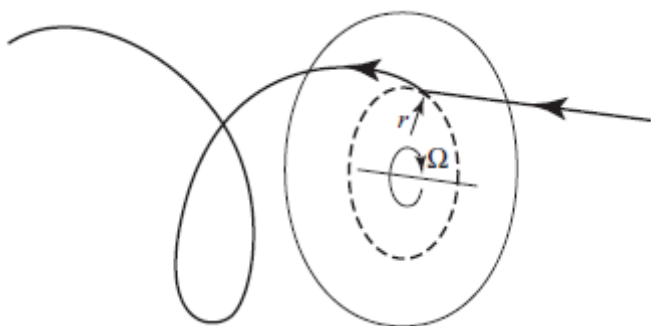
- Rotação na esteira;
- Um número finito de pás associado à descontinuidade do escoamento e perda de ponta nas pás;
- Existência de forças de resistência aerodinâmica.

4.1.3. Rotação da esteira e a teoria do momento angular

A maneira pela qual a energia é extraída e convertida depende particularmente do projeto da turbina usada. A maior parte dos aerogeradores atuais empregam um rotor com um determinado número de pás que giram com velocidade angular Ω , tendo o eixo de rotação paralelo à direção do vento. A geometria das pás é desenvolvida de maneira que o ar ao atravessá-las produz um torque aerodinâmico que posteriormente é convertido em energia elétrica, desta forma é requerido então um torque de mesmo valor e sentido oposto ao ar, gerando assim um movimento de rotação da esteira a jusante do rotor. Este movimento de

rotação implica uma perda adicional de energia, que é compensada por uma queda de pressão estática do ar a mais que a axial na região da esteira. A análise descrita anteriormente utilizando o disco atuador e a teoria do momento presume que nenhuma rotação é transmitida ao escoamento, ver figura 4.3.

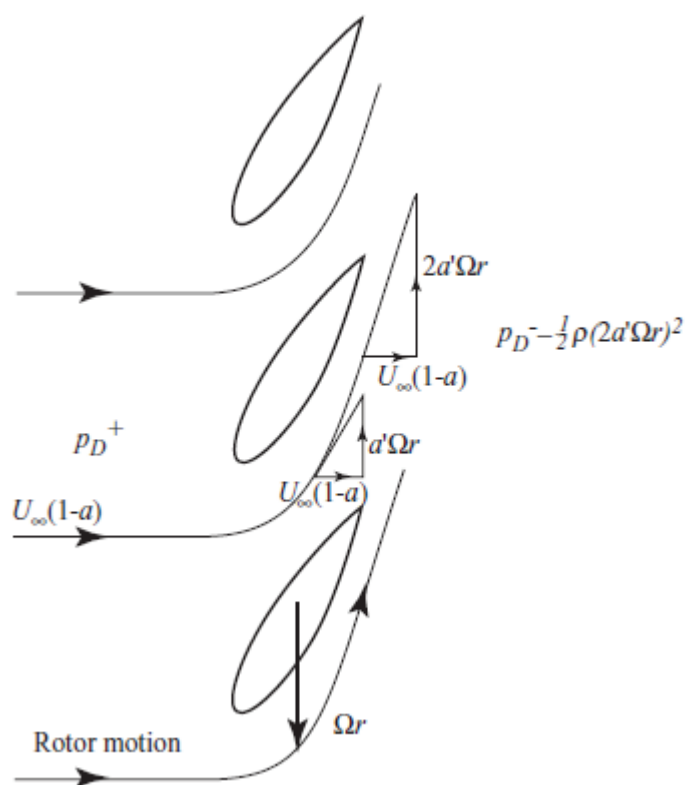
Figura 4.5 – Trajetória do ar ao atravessar o disco rotor



Fonte: (BURTON *et al.*, 2001).

A teoria do momento angular considera que a aquisição de movimento de rotação ocorre na espessura do disco. O ar ao atravessar o rotor possui inicialmente velocidade angular nula, figura 4.5. Ao atravessar a espessura do disco o ar adquire a jusante uma velocidade tangencial $2\Omega r a'$, sendo esta dependente da posição radial considerada, onde a' é definido como o fator de indução tangencial, ver figura 4.6.

Figura 4.6 – Ganho de velocidade tangencial na espessura do disco.

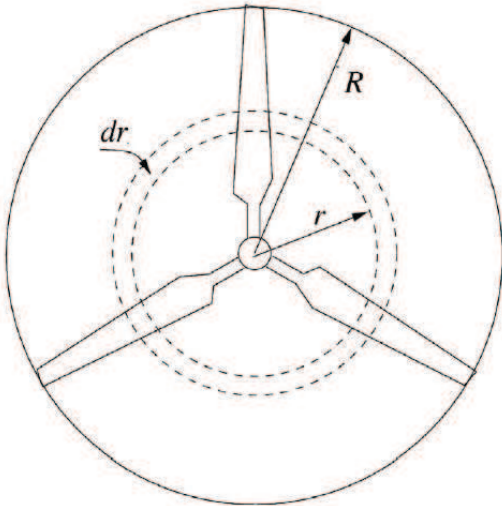


Fonte: (BURTON *et al.*, 2001).

Vê-se que agora a velocidade induzida pelo rotor não terá apenas uma componente axial, Ua , mas também uma componente no plano do rotor, $\Omega r a'$, que é expressa em termos do fator de indução tangencial, que contabiliza o ganho de velocidade tangencial conseguida pelo ar ao passar pelo rotor.

Considere uma seção anelar do disco rotor de posição radial r e espessura radial δr . O incremento de torque atuante na seção será responsável pela componente tangencial de velocidade do ar. Considerando que haja infinitas seções e não havendo interação entre elas, o torque total sobre o rotor será integrado e será igual à taxa de variação de momento angular adquirido pelo ar, figura 4.7.

Figura 4.7 – Seção anelar de um rotor com três pás.



Fonte: (HANSEN, 2008).

Escrevendo o incremento de torque como:

$$\delta Q = \rho \delta A_d U_\infty (1-a) 2\Omega a' r^2 \quad (4.19)$$

O lado direito da equação (4.19) é a taxa de variação do momento angular, dado pelo produto entre vazão mássica, variação de velocidade tangencial e posição radial. Note-se que δA_d representa o elemento de área da seção anelar.

Pode-se agora determinar o elemento de potência extraída pelo rotor multiplicando o elemento diferencial de torque pela velocidade angular.

$$\delta P = \delta Q \Omega \quad (4.20)$$

Assumindo que o elemento de potência obtido a partir do balanço do momento angular, equação (4.20) seja igual ao obtido anteriormente pelo balanço na direção axial utilizando a teoria do momento, equação (4.13), reescrita de forma diferencial para uma seção anelar,

$$2\rho \delta A_d U_\infty^3 a(1-a)^2 = \rho \delta A_d U_\infty (1-a) 2\Omega a' r^2 \quad (4.21)$$

Definindo $\lambda_r = \Omega r / U_\infty$, como a razão de velocidade local, e para $r = R$, $\lambda = \Omega R / U_\infty$, como a razão de velocidade de ponta, pode-se reescrever (4.21) como:

$$a(1-a) = \lambda_r^2 a' \quad (4.21.a)$$

Reescrevendo o elemento diferencial de potência extraída, equação (4.21) como:

$$\delta P = \delta Q \Omega = \left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 2\pi r \delta r \right) 4a'(1-a)\lambda_r^2 \quad (4.22)$$

O termo entre parênteses no lado direito da equação (4.22) representa a taxa com que a energia cinética atravessa a área de seção anelar, e pode-se interpretar o termo seguinte como a eficiência do elemento da pá.

$$\eta_r = 4a'(1-a)\lambda_r^2 \quad (4.23)$$

Em termos do coeficiente de potência tem-se:

$$\frac{\delta P}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 \pi R^2} = \frac{\left(\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 2\pi r \delta r \right) 4a'(1-a)\lambda_r^2}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 \pi R^2} \quad (4.24)$$

Rearranjando os termos da equação (4.24), obtém-se o quanto cada elemento da pá contribui para o coeficiente de potência C_p .

$$\frac{dC_p}{dr} = \frac{8a'(1-a)\lambda_r^2 r}{R^2} \quad (4.25)$$

Ou da mesma forma pode-se escrever em função da fração do tamanho da pá:

$$\frac{dC_p}{d\mu} = 8(1-a)a' \lambda^2 \mu^3 \quad (4.26)$$

Sendo $\mu = \frac{r}{R}$.

Sabendo a dependência de a e a' com a posição radial pode-se integrar a equação (4.26) e obter o coeficiente de potência da pá para uma determinada condição de operação dada pela razão de velocidade de ponta λ .

Interessa nesse momento determinar os valores de a e a' que tornem a extração da energia o mais eficiente possível, para tal devem-se determinar os valores que maximizam a expressão da equação (4.23).

Diferenciando a equação (4.23),

$$d\eta_r = -4a' \lambda_r^2 da + 4(1-a) \lambda_r^2 da' = 0 \quad (4.27)$$

Resulta,

$$\frac{da}{da'} = \frac{(1-a)}{a'} \quad (4.28)$$

Para obter a relação entre a e a' diferencia-se também a equação (4.21.a), assim,

$$\frac{da}{da'} = \frac{\lambda_r^2}{1-2a} \quad (4.29)$$

Por fim, de (4.28) e (4.29) obtêm-se os fatores indução na situação de potência máxima.

$$a = \frac{1}{3} \quad \text{e} \quad a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (4.30)$$

Pode-se agora determinar a potência máxima integrando a equação (4.26).

$$C_p = \int_0^1 8(1-a)a' \lambda^2 \mu^3 d\mu \quad (4.31)$$

Substituindo os valores ótimos,

$$C_{p\max} = \int_0^1 8(1-a) \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \lambda^2 \mu^3 d\mu$$

Resulta,

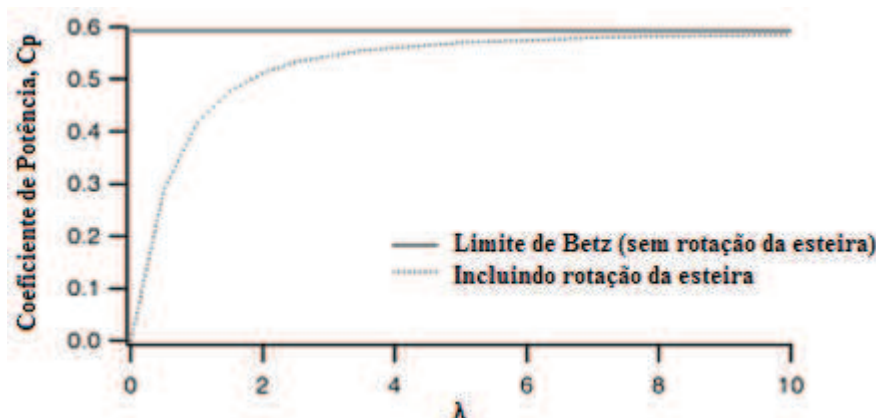
$$C_{p\max} = 4a(1-a)^2 = \frac{16}{27} \quad (4.32)$$

Tem-se o mesmo valor teórico máximo que foi obtido pela teoria do momento desconsiderando a rotação da esteira. Porém ao inserir-se na análise a rotação da esteira, esta representa uma perda de energia que poderia ser utilizada e o coeficiente de potência passa a ter uma dependência com λ . Um fato compreensível, visto que em condições de baixa velocidade de rotação, ou baixos valores de λ , da equação (4.20) vê-se que se deve ter um alto valor de torque para uma dada potência, em contrapartida à conservação do momento angular isso eleva a velocidade tangencial da esteira, reduzindo assim a potência extraída. Jansen e Smulder (1977) apresentam uma expressão para a dependência de C_p com λ , para um rotor com número infinito de pás e ausência de arraste aerodinâmico.

$$C_p = \frac{16}{27} \exp(-0,35\lambda^{-1,29}) \quad (4.33)$$

A figura 4.8 apresenta graficamente a análise da dependência de C_p com λ . No limite para valores altos de λ os valores de C_p obtidos com a inclusão da rotação da esteira tendem ao limite de Betz.

Figura 4.8 – Coeficiente de potência em função da relação de velocidade de ponta.



Fonte: (MANWELL *et al.*, 2006).

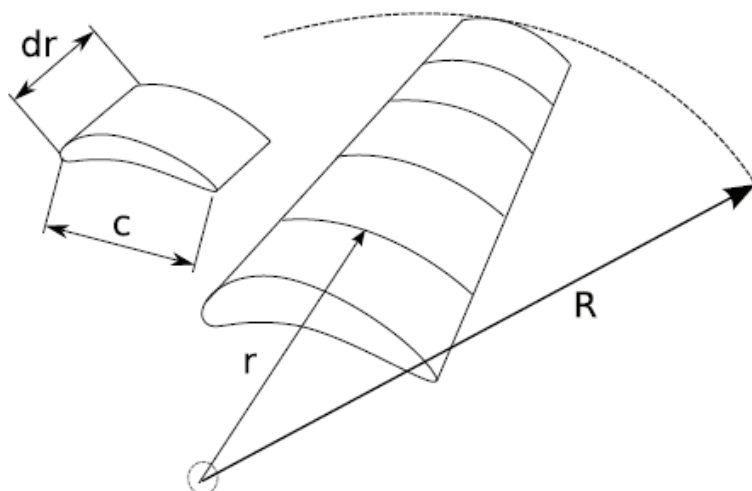
4.2. Teoria do momento do elemento de pá – BEM

A capacidade de um aerogerador em converter a energia eólica que flui através da área varrida do rotor é resultado de suas propriedades aerodinâmicas. Os modelos analisados anteriormente ainda não fazem menção alguma a uma geometria específica que viabilize um melhor desempenho na extração da energia. Um passo adiante na compreensão e projeto de aerogeradores consiste em focar a atenção no principal componente dos rotores, as pás.

A teoria do momento do elemento de pá (BEM) combina as teorias gerais do momento em suas componentes axial e angular e a teoria do elemento de pá. As características gerais dos perfis aerodinâmicos utilizados, como coeficientes de sustentação e arrasto, e comprimento de corda, serão parâmetros presentes em toda a análise. Posteriormente a geometria da pá que forneça a melhor eficiência pode ser determinada.

Inicialmente, considera-se a pá dividida em várias seções de comprimento dr ao longo da dimensão radial, ver figura 4.9. As forças aerodinâmicas em cada elemento podem ser calculadas tendo o conhecimento das características bidimensionais do perfil. Sabendo-se o ângulo de ataque, determinado a partir da velocidade resultante incidente na seção transversal do elemento e para um dado valor de a e a' , pode-se determinar a força atuante em cada seção, e por meio de integração determinar a força e o torque sobre a pá inteira.

Figura 4.9 – Pá dividida em seções (elementos de pá).



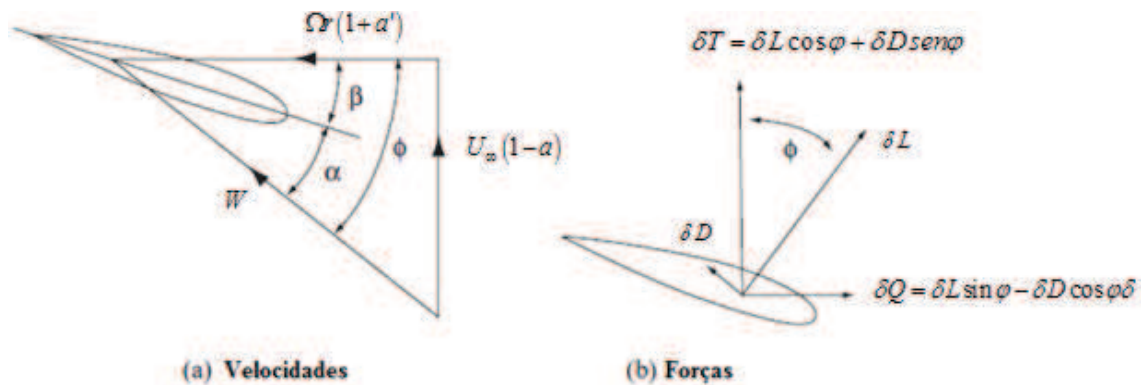
Fonte: (Ingram, G., 2005)

De acordo com a análise do BEM, a alteração do momento angular do ar ocorre unicamente devido à ação das forças aerodinâmicas na interação com as pás. Seções vizinhas da pá são aerodinamicamente independentes, ou seja, cada seção atua isoladamente. Desconsidera-se ainda o escoamento radial, sendo dessa forma considerado um escoamento bidimensional.

A velocidade do ar relativa às pás é dada pela soma vetorial de duas componentes, uma componente axial, $U_\infty(1-a)$ (soma da velocidade de corrente livre mais a velocidade axial induzida) e uma componente tangencial $\Omega r(1+a')$, dada pela soma das velocidades tangencial da pá Ωr com a velocidade induzida $\Omega r a'$.

A figura 4.8 ilustra as componentes de velocidade do ar ao atingir o perfil de um elemento da pá localizado em uma posição radial r .

Figura 4.10 – Velocidades e forças em cada elemento da pá.



Fonte: (BURTON *et al.*, 2001).

Assim a velocidade resultante em cada seção pode ser escrita como,

$$W = \sqrt{U_\infty^2 (1-a)^2 + \Omega^2 r^2 (1+a')^2} \quad (4.34)$$

Sendo,

$$\sin \varphi = \frac{U_\infty (1-a)}{W} \quad \text{e} \quad \cos \varphi = \frac{\Omega r (1+a')}{W} \quad (4.35)$$

Onde φ é definido como o ângulo de fluxo, ângulo formado entre o plano de rotação das pás e a velocidade relativa, sendo φ função da posição radial r . A variável β é o ângulo geométrico de torção, que será discutido em mais detalhes adiante. O ângulo de ataque é dado por,

$$\alpha = \varphi - \beta \quad (4.37)$$

Pode-se agora determinar as forças aerodinâmicas atuantes em cada elemento da pá. As componentes de sustentação do inglês *lift* e de arrasto do inglês *drag*, como ilustradas na figura 4.8.b são escritas como,

$$dL = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_l dr \quad (4.38)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_d dr \quad (4.39)$$

A resultante das forças de sustentação e arrasto, pode ainda ser decomposta em uma componente axial, normal ao plano de rotação da pá, indicada pela letra T e uma componente responsável pelo torque no elemento, indicado pela letra Q .

$$dT = dL \cos \varphi + dD \sin \varphi = \frac{1}{2} \rho W^2 B c (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) dr \quad (4.40)$$

$$dQ = dL \sin \varphi - dD \cos \varphi = \frac{1}{2} \rho W^2 B c (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r dr \quad (4.41)$$

Pode-se então combinar os resultados obtidos pela teoria do momento nas componentes axial e angular, com a forma escrita anteriormente da pá dividida em seções.

Pela teoria do momento a taxa de variação do momento axial do ar ao passar por uma seção anelar do rotor localizada na posição radial r é dada por:

$$\rho U_\infty (1-a) 2\pi r \delta r 2a U_\infty = 4\pi \rho U_\infty^2 a(1-a) r \delta r \quad (4.42)$$

A queda de pressão causada pela rotação da esteira é compensada por um aumento da pressão dinâmica, dado por,

$$\frac{1}{2}(2a'\Omega r)^2 \quad (4.41)$$

Assim a componente de força axial terá um termo adicional,

$$\frac{1}{2}(2a'\Omega r)^2 2\pi r \delta r \quad (4.43)$$

Igualando a força axial atuando no elemento da pá, equação (4.40), à taxa de variação do momento tem-se,

$$\frac{1}{2}\rho W^2 N c (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) dr = 4\pi\rho \left[U_\infty^2 a(1-a) + (a'\Omega r)^2 \right] r \delta r \quad (4.44)$$

Onde N representa o número de pás.

De forma simplificada,

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) = 8\pi \left[a(1-a) + (a' \lambda \mu)^2 \right] \mu \quad (4.45)$$

Onde $\mu = \frac{r}{R}$.

Pode-se fazer então a mesma análise para a parcela angular do momento atravessando o rotor. A taxa de variação do momento angular do ar ao passar pela seção anelar de posição radial r é dada por:

$$\rho U_\infty (1-a) \Omega r 2a' r 2\pi r \delta r = 4\pi\rho U_\infty (\Omega r) a'(1-a) r^2 \delta r \quad (4.46)$$

Igualando a equação (4.46) ao torque diferencial no elemento de pá dado pela equação (4.41),

$$\frac{1}{2} \rho W^2 N c (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r dr = 4\pi \rho U_\infty (\Omega r) a' (1-a) r^2 \delta r \quad (4.47)$$

Simplificando,

$$\frac{W^2}{U_\infty^2} N \frac{c}{R} (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) r dr = 8\pi \lambda \mu^2 a' (1-a) \quad (4.48)$$

Do sistema formado pelas equações (4.45) e (4.48), pode-se obter após algumas manipulações algébricas, as expressões para a determinação dos fatores de indução axial e tangencial ao longo da pá, assim,

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4(\text{sen}\phi)^2} \left[C_x - \frac{\sigma_r^2}{4(\text{sen}\phi)^2} C_y^2 \right] \quad (4.49)$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{\sigma_r C_y}{4\text{sen}\phi \cos \phi} \quad (4.50)$$

Onde σ_r é a solidez local da pá, que é definida como a área planiforme do elemento da pá dividido pela área da seção anelar do rotor. Da mesma forma a solidez da pá, representada por σ , é por definição a área planiforme das pás dividida pela área total do disco rotor, sendo um dos parâmetros fundamentais na determinação do desempenho do aerogerador.

$$\sigma_r = \frac{Nc}{2\pi r} \quad (4.51)$$

Por conveniência também pode ser escrito,

$$C_x = C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi \quad (4.52)$$

$$C_y = C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi \quad (4.53)$$

Para a determinação do torque e potência do rotor é necessário o conhecimento dos fatores de indução axial e tangencial, que são obtidos a partir da solução das equações (4.49) e (4.50). A solução usual se obtém através de um procedimento iterativo, fazendo uso também da informação dos coeficientes de sustentação e de arrasto do perfil aerodinâmico utilizado em função do ângulo de ataque. No processo iterativo assume-se inicialmente a e a' iguais à zero, determina-se então ϕ e em seguida C_l e C_d de uma base de dados do perfil. A partir daí calculam-se novamente os fatores de indução, e o processo se repete até que a convergência dos valores seja alcançada.

Conforme visto em seções anteriores, um problema surge quando $a > 0,5$. A teoria do momento prevê um fluxo reverso na esteira, fato este que não ocorre na prática. Para altos valores de λ o rotor passa a se comportar de forma cada vez menos permeável, ocorre escoamento radial e a esteira se torna turbulenta. O coeficiente de empuxo apresenta valores bem maiores do que o previsto na teoria do momento, dessa forma uma correção deve ser utilizada no processo iterativo.

Usualmente a correção é feita utilizando a relação empírica de *Glauert*. Assim para valores de $a > 0,4$ ou $C_T > 0,96$ faz-se uso da relação entre o fator de indução e o coeficiente de empuxo local, dada por (MANWELL et al., 2006):

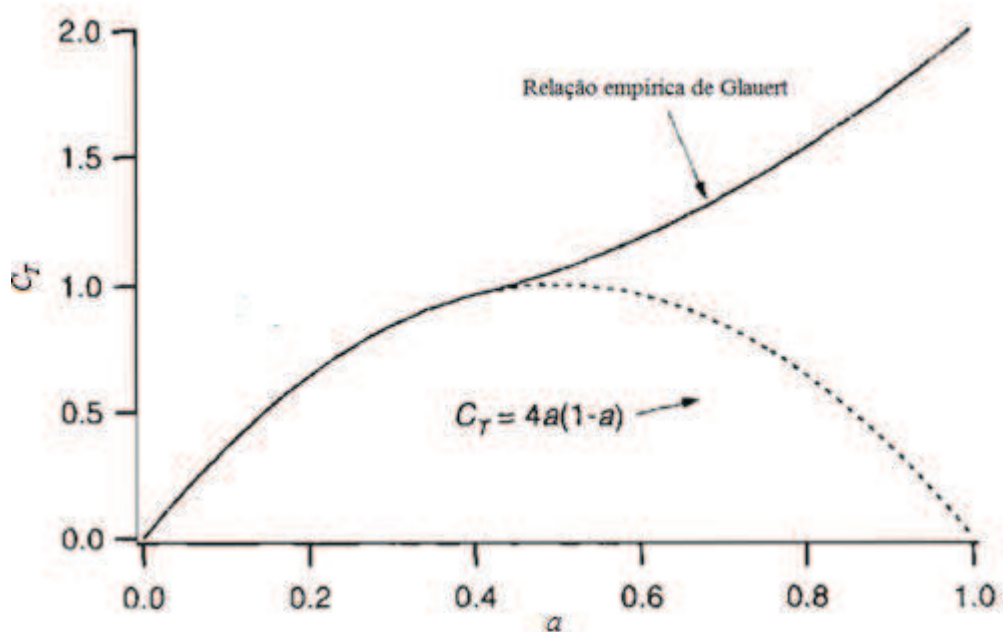
$$C_l = \sigma' (1-a)^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) / \sin^2(\varphi) \quad (4.54)$$

O fator de indução axial no regime onde não é válida a teoria do momento fica escrito da seguinte forma:

$$a = (1/F) \left[0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_T)} \right] \quad (4.55)$$

Onde F, que será discutido em seções adiante, é definido como o fator de perda de ponta de pá. A figura 4.11 ilustra a relação entre o coeficiente de empuxo dado pela relação de *Glauert* e a prevista pela teoria do momento.

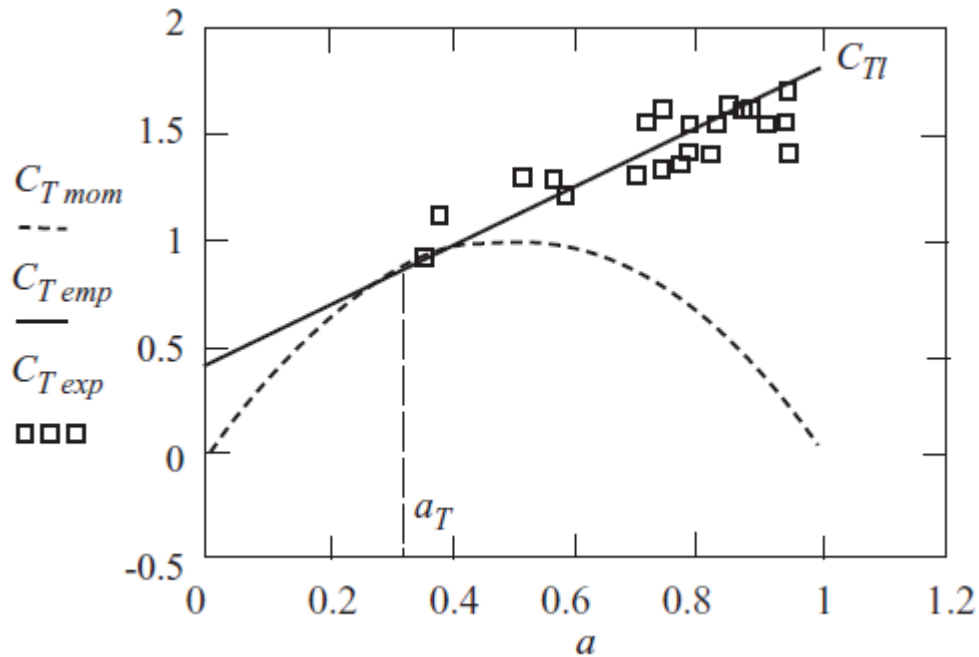
Figura 4.11 - Coeficiente de empuxo.



Fonte: (MANWELL *et al.*, 2006)

Outra abordagem assume uma correção linear de ajuste aos dados experimentais da relação entre o coeficiente de empuxo e o fator de indução axial. A figura 4.12 compara os resultados experimentais com os previstos pela teoria do momento.

Figura 4.12 – Comparação teórica experimental de C_T .



Fonte: (BURTON *et al.*, 2001).

Se C_{T1} é o valor experimental de C_T quando $a=1$, a reta de ajuste deve ser tangente à parábola de C_{Tmom} (teoria do momento) em um ponto de transição a_T . Assim pode-se expressar a reta de ajuste da seguinte forma:

$$C_T = C_{T1} - 4(\sqrt{C_{T1}} - 1)(1 - a) \quad (4.56)$$

O valor a de transição sendo dado por,

$$a_T = 1 - \frac{1}{2}\sqrt{C_{T1}} \quad (4.57)$$

Em Wilson e Lissaman (1974), o valor C_{T1} é dado por $C_{T1} = 1,6$.

De posse dos valores dos fatores de indução, o torque gerado nas pás pode ser obtido por meio de integração. O torque total dessa forma pode ser escrito como (BURTON *et al.*, 2001):

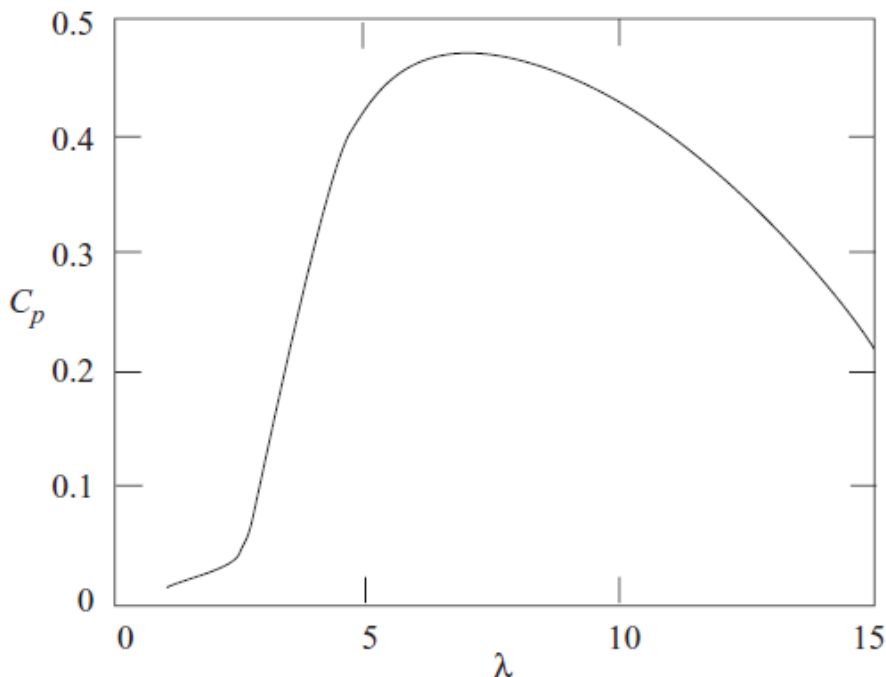
$$Q = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 \pi R^3 \lambda \int_0^R \mu^2 \left[8a'(1-a)\mu - \frac{W}{U_{\infty}} \frac{N^c}{\pi} C_d(1+a') \right] d\mu \quad (4.58)$$

Como a potência do rotor é dada por $P = Q\Omega$, pode-se ainda reescrever a equação (4.54) em termos do coeficiente de potência.

$$C_p = \lambda^2 \int_0^R \mu^2 \left[8a'(1-a)\mu - \frac{W}{U_{\infty}} \frac{B^c}{\pi} C_d(1+a') \right] d\mu \quad (4.59)$$

O coeficiente de potência varia de acordo com as condições de operação. Usualmente costuma-se avaliar o desempenho do rotor da através da curva de C_p versus λ . A figura 4.13 ilustra uma curva típica da dependência de C_p com λ para uma turbina moderna.

Figura 4.13 - Curva de potência de uma turbina de eixo horizontal.



Fonte: (BURTON *et al.*, 2001).

4.3. Geometria da pá para uma velocidade de operação variável

O projeto da pá de uma turbina eólica depende de diversos fatores, entre eles a velocidade específica de projeto, o número de pás, o raio da pá, e os coeficientes de sustentação e arraste do perfil utilizado. Usando as expressões do BEM, pode-se formular as características geométricas que forneçam a máxima potência extraída mantendo-se fixa a velocidade específica de projeto independente das condições do vento.

Para um λ fixo, usando a equação (4.48), o torque em cada elemento da pá é maximizado se,

$$\frac{d}{da'} [8\pi\lambda\mu^2 a'(1-a)] = 0 \quad (4.60)$$

O que resulta,

$$\frac{da}{da'} = \frac{(1-a)}{a'} \quad (4.61)$$

Das equações (4.45) e (4.48), que representam as forças axial e tangencial nos elementos da pá, obtém-se dividindo uma pela outra,

$$\frac{\frac{C_l}{C_d} \tan \phi - 1}{\frac{C_l}{C_d} + \tan \phi} = \frac{\lambda\mu a'(1-a)}{a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2} \quad (4.62)$$

Reescrevendo $\tan \phi$, a partir da relação entre as velocidades relativas à pá, ver figura 4.10.

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{\lambda\mu(1+a')} \quad (4.63)$$

Substituindo a expressão (4.63) em (4.62),

$$\left[\frac{C_l}{C_d}(1-a) - \lambda\mu(1+a') \right] \left[a(1-a) + (a'\lambda\mu)^2 \right] = \left[\lambda\mu(1+a') \frac{C_l}{C_d} + (1-a) \right] \lambda\mu a'(1-a)$$

De acordo com BURTON et al. (2002), para a condição de projeto, se o arraste for ignorado pode-se escrever:

$$a(1-a) - \lambda^2 \mu^2 a' = 0 \quad (4.64)$$

Diferenciando (4.64) em relação a a' ,

$$(1-2a) \frac{da}{da'} - \lambda^2 \mu^2 = 0 \quad (4.65)$$

Substituindo (4.61) em (4.65),

$$(1-2a)(1-a) - \lambda^2 \mu^2 a' = 0 \quad (4.66)$$

Por fim, o sistema formado pelas equações (4.64) e (4.66) resulta para os fatores de indução ao longo da pá na condição otimizada,

$$a = \frac{1}{3} \quad \text{e} \quad a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \quad (4.67)$$

O resultado concorda com a predição da teoria do momento, pois todas as perdas foram desconsideradas. O próximo passo consiste em determinar a geometria da pá na condição de máxima eficiência, ou seja, a dependência da corda do perfil e o ângulo de torção com a posição radial ao longo da pá.

Da expressão do torque no elemento de pá, equação (4.48), desconsiderando novamente o arrasto e substituindo $\text{sen}\phi$,

$$\frac{W}{U_\infty} N \frac{c}{R} C_l (1-a) = 8\pi\lambda\mu^2 a'(1-a) \quad (4.68)$$

Substituindo a velocidade resultante na expressão (4.68), bem como os valores ótimos dos fatores de indução axial e tangencial, obtém-se a expressão da corda do perfil em função da posição radial da pá.

$$\frac{N}{2\pi} \frac{c}{R} \lambda C_l = \frac{\frac{8}{9}}{\sqrt{\frac{4}{9} + \lambda^2 \mu^2 \left[1 + \frac{2}{9(\lambda^2 \mu^2)} \right]^2}} \quad (4.69)$$

Para o projeto da pá, o coeficiente de sustentação C_l é mantido constante, e este é escolhido de forma que forneça o maior valor da razão C_l/C_d do perfil aerodinâmico utilizado.

Um fato importante acerca da força de sustentação ao longo da pá pode ser obtido a partir da expressão para o torque em cada elemento. Da equação (4.47) a força de sustentação por intervalo de comprimento na direção radial, desconsiderando o arrasto, é dada por:

$$L \sin \phi = 4\pi \rho \frac{U_\infty^3}{\Omega} a(1-a)^2 \quad (4.70)$$

Mas, pelo teorema de Kutta–Joukowski a sustentação é escrita como,

$$L = \rho W \Gamma \quad (4.71)$$

Onde Γ é a circulação da velocidade ao longo do perfil, dada por uma integral de linha fechada. Assim de (4.70) e (4.71) se obtém,

$$\Gamma = 4\pi \frac{U_\infty^2}{\Omega} a(1-a) \quad (4.72)$$

Ou seja, na condição otimizada, a circulação da velocidade é uniforme ao longo de cada perfil.

Para que cada seção da pá esteja sujeita à máxima força de sustentação possível relativa ao arrasto, o ângulo de fluxo ϕ e o ângulo de torção β devem também variar ao longo da dimensão radial da pá. Substituindo os valores ótimos dos fatores de indução na expressão do (4.63) do ângulo de fluxo, tem-se:

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{\frac{2}{3}}{\lambda\mu \left(1 + \frac{2}{9\lambda^2\mu^2} \right)} \right] \quad (4.73)$$

Assim a torção da pá, que por definição é o ângulo formado pela corda do perfil e o plano de rotação, é dada por,

$$\beta = \phi - \alpha \quad (4.74)$$

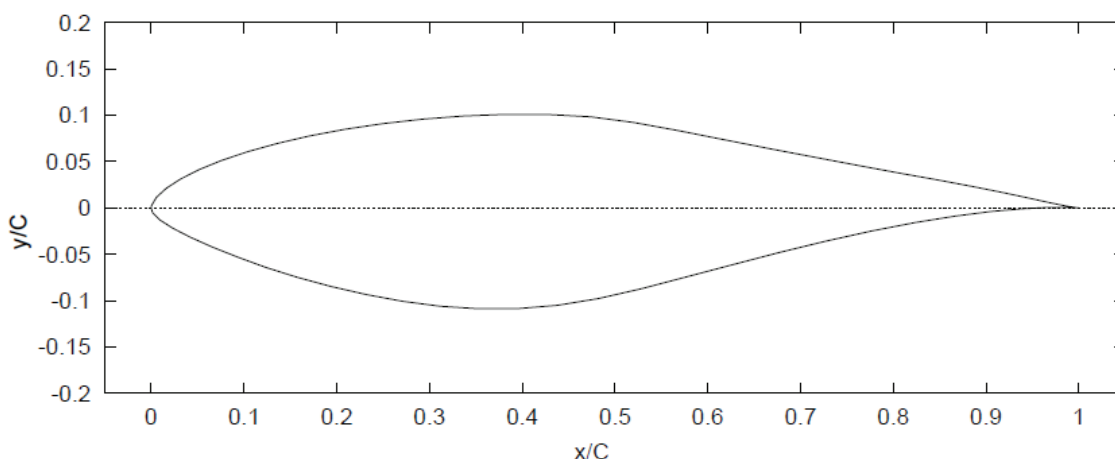
Onde α é fixo, sendo o ângulo de ataque correspondente à máxima razão C_l / C_d do perfil.

5 METODOLOGIA

5.1. Dimensionamento e características gerais das pás

O dimensionamento das pás foi baseado nas equações (4.73) e (4.69), obtidas pela teoria do BEM. Quatro conjuntos de pás distintas foram utilizados nos testes, estes diferindo entre si pelo valor da razão de velocidade de ponta de projeto, sendo os valores de λ iguais a seis, sete, oito e nove. O perfil aerodinâmico utilizado nas pás foi o perfil NREL S809, figura 5.1, que é projetado especialmente para turbinas de eixo horizontal e dispõe na literatura de uma ampla quantidade de dados experimentais para consulta. A disposição do rotor utilizado nos testes é do tipo tripá, de raio 1,5 metros.

Figura 5.1 – Perfil NREL S809.



Fonte: (Bertagnolio et al., 2001)

O valor do coeficiente de sustentação para a condição de projeto C_l/C_d máximo foi $C_l = 0,748$, sendo ângulo de ataque $\alpha = 6,11$, para um número de Reynolds $3 \cdot 10^5$. (Butterfield et al., 1992).

5.2. Aparato de medição

Para aquisição das medidas de campo e obtenção das curvas de desempenho das pás, deve-se contar com um aparato para medição das principais variáveis mecânicas envolvidas no funcionamento do aerogerador, que são rotação, torque e velocidade do vento.

A descrição dos instrumentos usados nas medições, bem como a disposição do aparato para realização dos testes será descrita a seguir.

a) Torque

Para a medição do torque utilizou-se um transdutor que funciona por strain gage, com sistema de posição angular indutivo, capaz de medir torque em um eixo sob condições estática e dinâmica. O modelo usado foi o HBM T22. As especificações técnicas de acordo com o fabricante são: Faixa de leitura até 200N.m com erro $\leq \pm 0,3\%$ e taxa de rotação limite 9000 rpm. Possui fonte de alimentação de 11,5 V até 30 V e com sinal saída analógica de 0 a 5 V.



Figura 5.2 - Transdutor de torque T22HBM. (www.hbm.com)

O transdutor foi conectado ao eixo do rotor por acoplamentos do tipo mandíbula. Para geração de um torque resistente e a viabilização de sinal pelo transdutor contou-se ainda com um sistema de freio tipo sapata conectado por cabo de aço e polias de desvio.

b) Rotação

Para a aquisição dos valores de rotação das pás, utilizou-se um tacômetro digital, modelo TS-TADIG (Figura 5.3), com sensor indutivo de proximidade e que tem por base de funcionamento um contador de pulsos unidirecional microcontrolado que opera na faixa dos 4MHz.

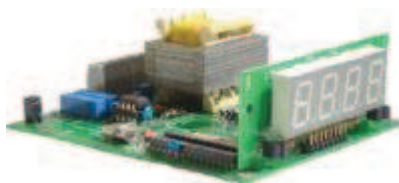


Figura 5.3 - tacômetro digital, modelo TS-TADIG.

O tacômetro conta com as seguintes configurações: Display de sete segmentos com 4 dígitos; Faixa de indicação de velocidade de 0 a 9999 rpm; Sinal de saída opcionais: analógico de 0 a 5Vdc ou 4 a 20mA, digital PWM de 0 a 100%; Tensão de alimentação: 127 / 220 Vac; Entrada para encoder de um pulso por revolução. (www.tesequipamentos.com.br)

c) Velocidade do vento

Os valores de velocidade do vento foram obtidos com a utilização de um anemômetro, modelo WindMaster 1590-PK-20 (Figura 5.5), que tem por base do funcionamento o tempo de percurso na emissão de pulsos ultrassônicos por transdutores com faces paralelas (figura 5.4). Para cada par de transdutores a velocidade em uma direção é medida, sendo um total de três pares correspondendo às direções U, V e W, predispostas segundo as orientações do fabricante.

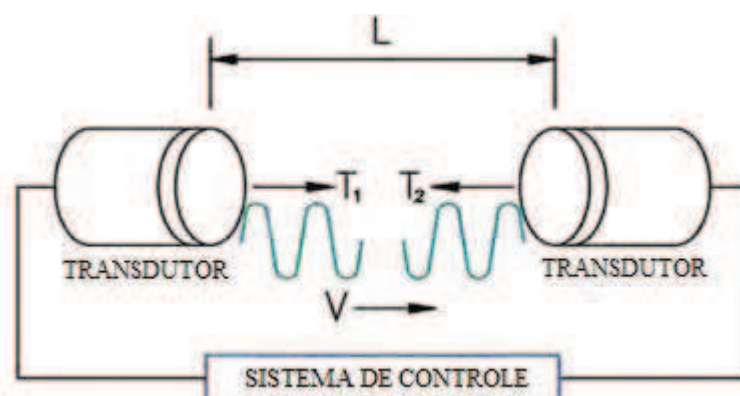


Figura 5.4 – Sinais ultrassônicos do anemômetro. (Windmaster-pro-manual)

Sendo, T_1 e T_2 , os tempos de percursos dos sinais, V a velocidade do ar na direção dos transdutores e C a velocidade do som. A medida da velocidade do ar em uma direção é de acordo com o manual do instrumento dada por,

$$V = \frac{L}{2} \left\{ \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right\}$$

Onde,

$$T_1 = \frac{L}{C+V} \quad \text{e} \quad T_2 = \frac{L}{C-V}$$

As especificações técnicas também incluem: Faixa de leitura de velocidade de 0 a 45m/s, com resolução de 0,01m/s, 1,5% RMS. Intervalo de temperatura de operação de $-40^{\circ}C$ a $70^{\circ}C$. Dimensões $0,75m \times 0,24m$.



Figura 5.5 - WindMaster 1590-PK-20 (www.omniinstruments.co.uk)

d) Conversores de sinal e Data Logger.

Os sinais obtidos pelos instrumentos de medição utilizados são todos analógicos, seguindo o formato de saída: tacômetro: $4-20mA$, torquímetro: $0-10Vcc$ e anemômetro: $0-5Vcc$. Para captura do sinal e posterior conversão utilizou-se dois conversores, modelo EL 005 Enviromon, de 4 canais cada, sendo um conversor para utilização no torquímetro e no tacômetro e outro para o anemômetro. Para o armazenamento dos sinais convertidos e

monitoramento utilizou-se ainda um Data Logger modelo EL037 Enviromon. Os equipamentos depois de conectados foram acomodados em uma caixa plástica para transporte e utilização em campo.



Figura 5.6 – Conversor e Data logger

e) Torre, posicionamento das pás e disposição geral dos instrumentos.

Uma torre de comprimento 5m, composta por quatro blocos desmontáveis, figura 5.7, foi utilizada para dispor as pás em altura para realização das medidas. Estaios para assegurar a ancoragem da torre foram posicionados a uma altura de 3,5m da base desta, figura 5.8. Pelos quatro blocos desmontáveis seguia internamente toda a fiação necessária para a conexão dos freios, torquímetro e sensor do tacômetro.



Figura 5.7 – blocos desmontáveis e base da torre. (Lopes, 2011)

Conectados à nacele foram dispostos o transdutor de torque e o sensor indutivo do tacômetro, figura 5.8. O freio mecânico que possibilita a alteração do torque resistente possui o cabeamento interno à torre de forma a permitir o acionamento manual, ver figura 5.9.

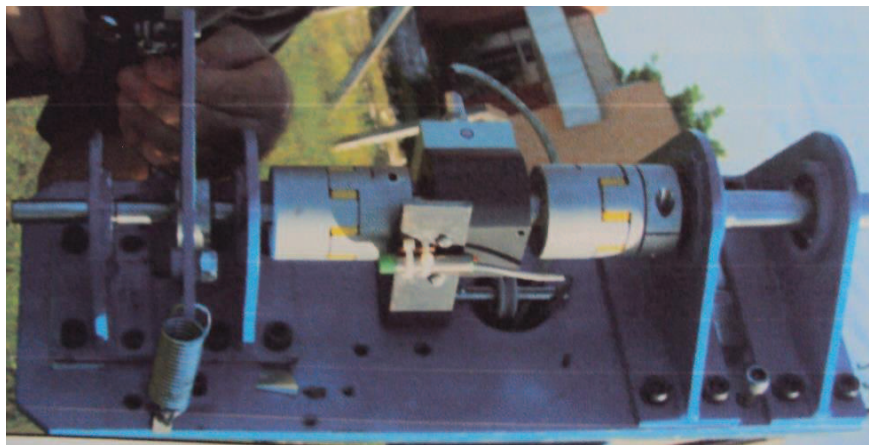


Figura 5.8 – Posicionamento do transdutor de torque e sensor do tacômetro (em verde). (Azevedo, 2011)



Figura 5.9 – Torre, fiação e alavanca de acionamento manual do freio.

Pelo eixo em torno do qual passa o transdutor de torque está o cubo do rotor. As pás são conectadas ao cubo por braçadeiras de aço, sendo necessárias duas para cada pá, num total de seis. Para o acoplamento das pás é necessário descer a torre, sendo esta ancorada por uma estaca, ver figura 5.10.



Figura 5.10 – Cubo e acoplamento das pás.

Utilizou-se também uma veleta para direcionamento do eixo das pás com a direção do vento, sendo esta presa à parte de trás da nacele, figura 5.11.



Figura 5.11 – Veleta de direcionamento do eixo do rotor.

O anemômetro foi posicionado à mesma altura das pás, para tanto utilizou-se uma torre desmontável com diâmetro menor do que o da torre principal, presa a quatro cabos e

fincadas ao solo por estacas, figura 5.12. Tomaram-se ainda as devidas precauções para que esta não oscile nem interfira nas medições.



Figura 5.12 – Torre do anemômetro.

f) Conexão dos instrumentos e aferição das medidas

O anemômetro foi conectado a um dos conversores de sinal. Utilizando quatro canais do instrumento, os sinais eram enviados ao datalogger e por último ao computador. Como cada um dos conversores possui quatro canais utilizou-se o outro conversor para a conexão do tacômetro e do transdutor de torque, e da mesma forma que o anemômetro, estes foram conectados ao datalogger e ao computador. Os sinais analógicos enviados ao datalogger eram processados e a cada minuto se tinha um valor médio de corrente obtido pelo tacômetro e valores de tensão obtidos pelo anemômetro e transdutor de torque. Os dados coletados eram manipulados através do Software Enviromon. O diagrama esquemático da conexão dos aparelhos e aferição das medidas é ilustrado na figura 5.13.

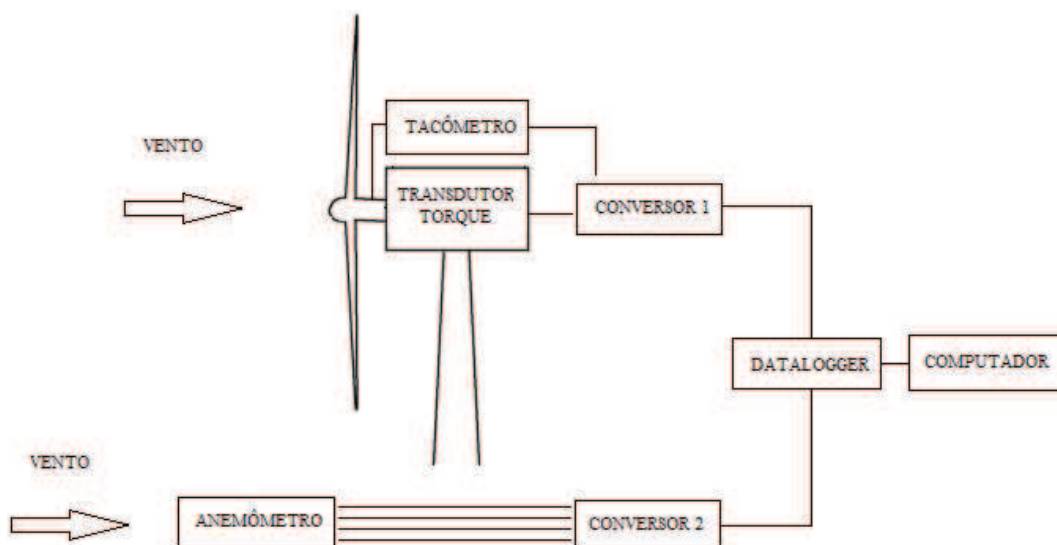


Figura 5.13– Diagrama esquemático da conexão dos instrumentos.

As medidas obtidas pelos instrumentos eram em valores de tensão (Volts) ou corrente (mA) e para conversão de valores para o torque, rotação e velocidade do vento em unidades SI utilizou-se a calibração baseada nos trabalhos de Azevedo (2011) e Lopes (2011), além de informações dos fabricantes.

Para o tacômetro a curva de tendência dos dados obtidos na calibração utilizada foi:

$$\text{Rotação} = 625,53 \times (\text{Corrente}) - 2493,1 \quad (5.1)$$

Com erro máximo de 0,25%

Para a conversão dos valores de sinal de torque utilizou-se

$$\text{Torque} = 40,441 \times (\text{Tensão}) - 1,377 \quad (5.2)$$

Com erro máximo de 1,8%

Para a conversão das medidas do anemômetro, utilizou-se, de acordo com o manual do fabricante do anemômetro, a relação:

$$\text{Velocidade} = 8 \times (\text{Tensão}) - 20 \quad (5.3)$$

g) Testes

Os testes foram realizados no campo experimental do laboratório de máquinas do Departamento de Engenharia Agrícola (DENA) da UFC no campus do Pici, figura (5.14), durante os dias:

Lambda 6 - dia 16 de maio

Lambda 7 - dias 4 e 9 de abril

Lambda 8 - dias 17 e 18 de abril e 28 de maio

Lambda 9 - dias 20 e 25 de abril

Para cada conjunto de pás testado adotou-se o critério de obtenção de no mínimo 100 pontos válidos, onde cada ponto compreendia um valor de torque, rotação e velocidade do vento.



Figura 5.14 – Local dos testes.

5.3. Tabulação e confecção das curvas de desempenho

Para confecção das curvas de desempenho utilizou-se além das equações de calibração da rotação, torque e velocidade do vento, dada pelas equações 5.1, 5.2 e 5.3 a expressão para o coeficiente de potência, dado pela equação 4.14.

$$C_p = \frac{P_{extraída}}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (4.14)$$

Sendo $P_{extraída}$ (Potência extraída pelo rotor) no numerador da equação (4.14) dado pelo produto do torque e velocidade angular de rotação medidos experimentalmente.

$$P_{extraída} = \text{Torque} \times \text{rotação}$$

Em todas as expressões utilizou-se também $\rho = 1,19 \text{ kg} / \text{m}^3$. Todos os resultados obtidos foram manipulados através do Software Enviromon, sendo a confecção dos gráficos e tratamento de dados utilizando uma planilha eletrônica.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Dimensionamento e geometria das pás

A geometria das pás obtida a partir das equações (4.73) e (4.69) para os valores de λ de projeto 6,7,8 e 9, são descritas a partir da dependência da corda do perfil e do ângulo de torção como função da dimensão radial ao longo da pá. O gráfico 6.1 mostra as curvas de afilamento e torção das pás utilizadas nos testes. Os valores numéricos da geometria das pás estão expressos em tabelas, ver anexo 9.1.

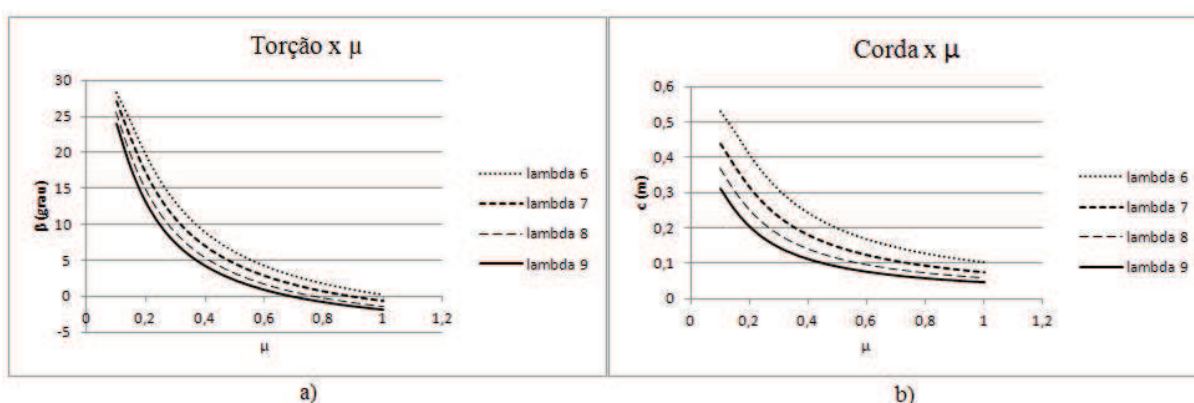


Gráfico 6.1- a) Curvas de torção das pás b) Curvas de afilamento.

Dos gráficos (a) e (b) verifica-se o decréscimo gradual tanto de torção quanto do valor de corda dos perfis utilizados nas pás. Isso garante que em regime de operação variável tenha-se maior eficiência na extração de energia. Espera-se maior eficiência de cada pá quando esta operar em λ de projeto, pois conforme descrito em seções anteriores o escoamento do ar nos perfis sob tais condições apresenta máxima razão sustentação-arraste.

As pás foram construídas por alunos de graduação do laboratório de aerodinâmica LAERO e foi utilizada madeira balsa, com os perfis montados e fixados em tubo de alumínio, tendo revestimento final de resina epóxi e fibra de vidro.

6.2. Curvas de desempenho

Os resultados dos testes foram descritos por curvas de desempenho que expressam a dependência da potência, torque e coeficiente de potência de cada pá como função da velocidade específica λ . Primeiramente tem-se o gráfico de pontos brutos de C_p versus λ , para cada λ de projeto. As características do regime de vento nos dias dos testes realizados são expressos na tabela 6.1.

$\lambda=6$	$\lambda=7$	$\lambda=8$	$\lambda=9$
Vel. Média (m/s)	Vel. Média (m/s)	Vel. Média (m/s)	Vel. Média (m/s)
2,9849	3,8211	2,674	3,3678
Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão	Desvio Padrão
1,1923	2,9644	0,7535	0,8221

Tabela 1- Características do vento nos testes.

6.2.1. C_p versus λ , pontos conforme obtidos.

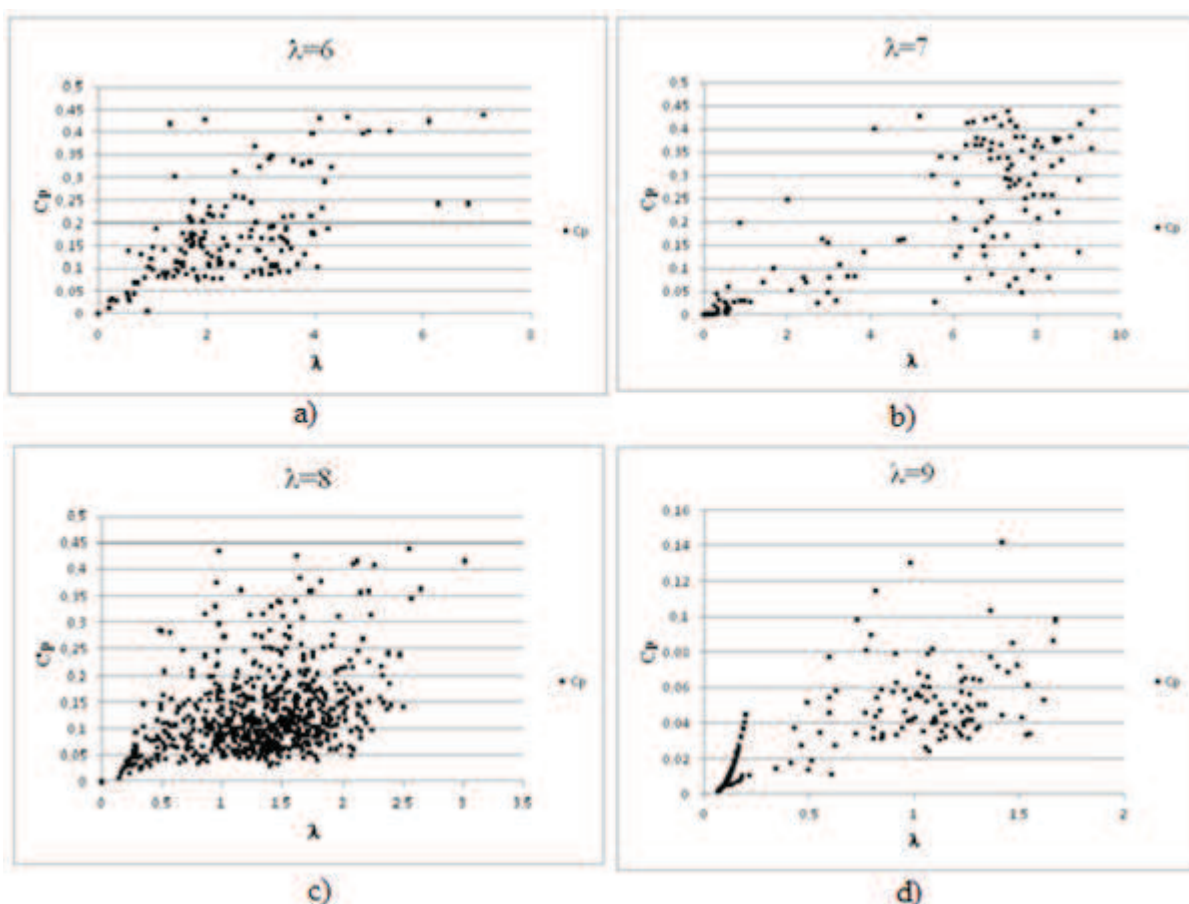


Gráfico 6.2- Curvas de nuvem, C_p versus λ .

Fez-se o tratamento dos dados dividindo os pontos obtidos em intervalos de valores de λ , (ver anexo 9.2), obtendo-se o valor médio de cada variável analisado no intervalo. O intervalo de erro foi avaliado baseando-se em uma distribuição t de Student com 95% de confiança e expresso por barras de erro. Obteve-se assim os gráficos de torque, potência e coeficientes potência com o tratamento dos dados.

Dentre as pás testadas as únicas que chegaram a operar no regime de projeto foram as pás de $\lambda = 7$ e $\lambda = 6$.

6.2.2. Torque versus λ

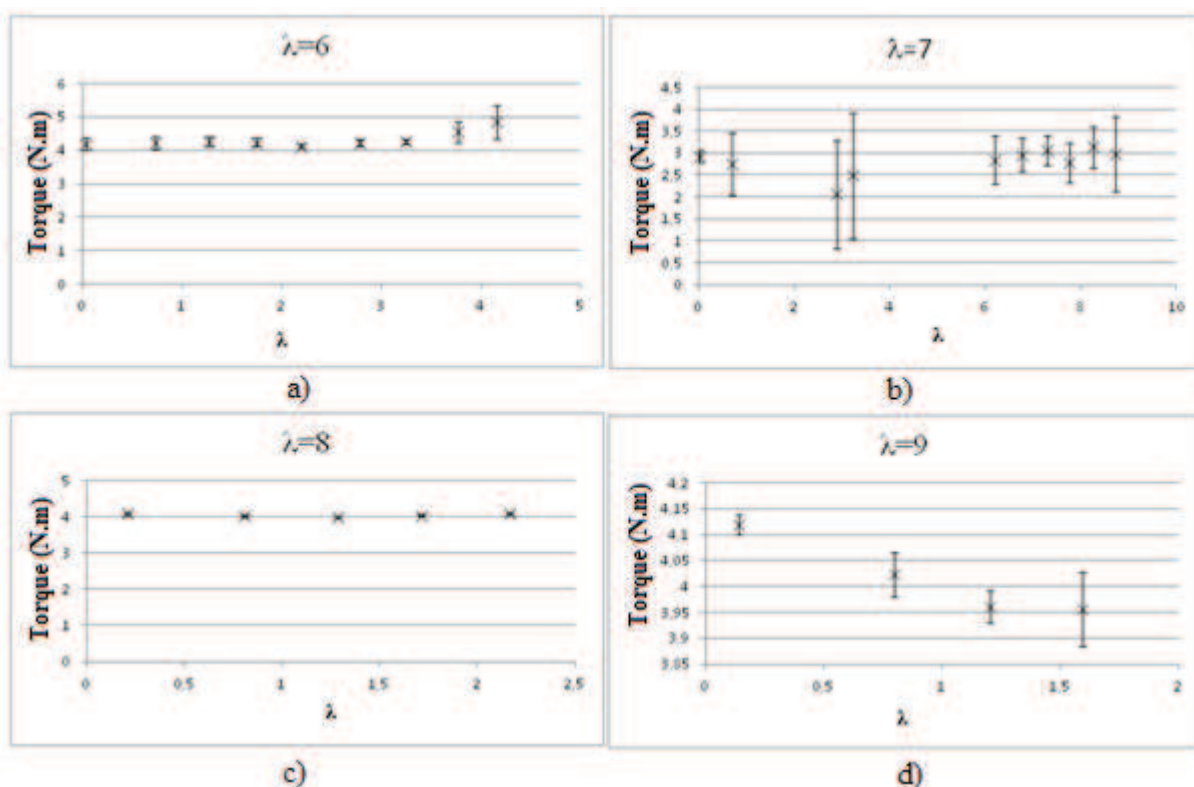


Gráfico 6.3- Curvas de torque versus λ .

O torque não apresentou uma variação significativa quando se considera sua dependência com o λ de operação para os quatro valores de λ de projeto testados em campo, sendo esta uma característica típica de aerogeradores de alta velocidade.

Para baixas rotações o torque é mantido devido ao alto ângulo de ataque, de onde decorrem altos valores de sustentação. Em condições de alta rotação o coeficiente de sustentação é reduzido devido ao ângulo de incidência dos ventos nas pás, porém devido ao aumento de velocidade a sustentação resultante é mantida. Esta é uma característica desejável

das turbinas de alto desempenho, pois, uma vez que o torque se mantém, o aumento de rotação acarreta em maior potência.

6.2.1. Potência versus λ

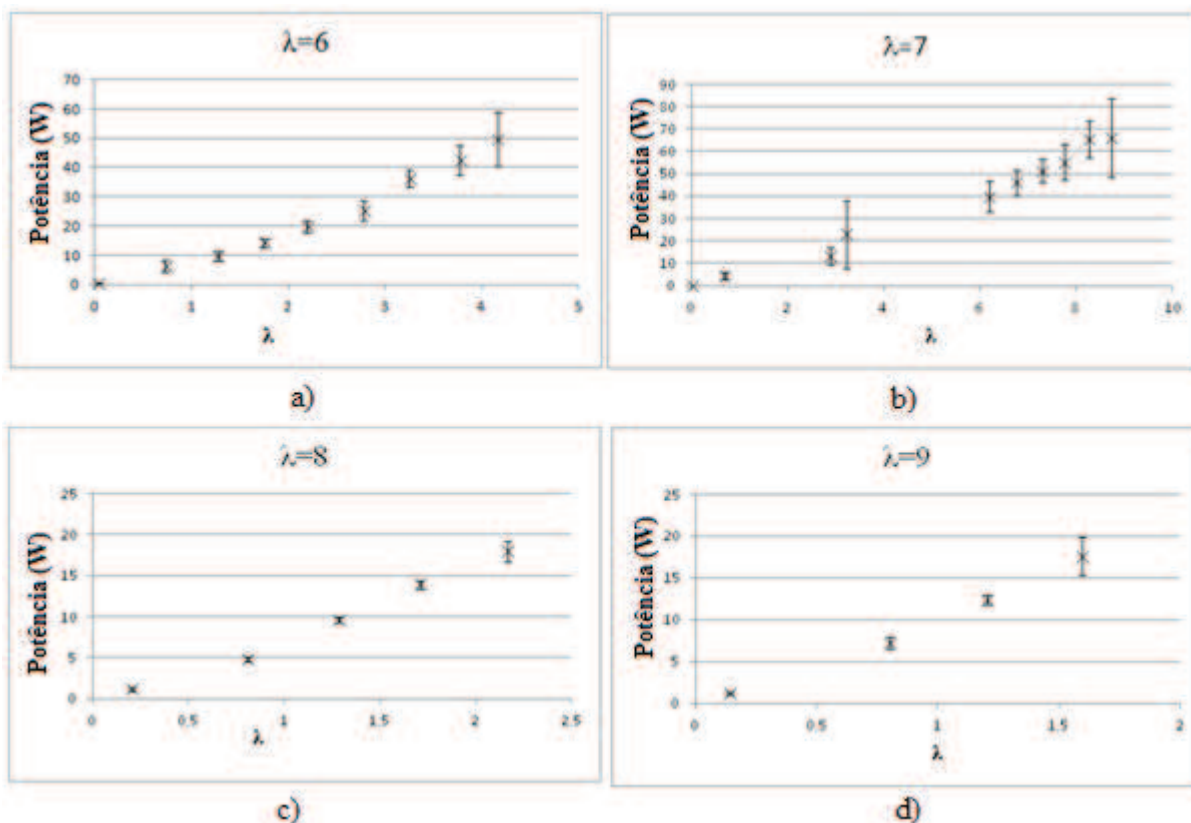
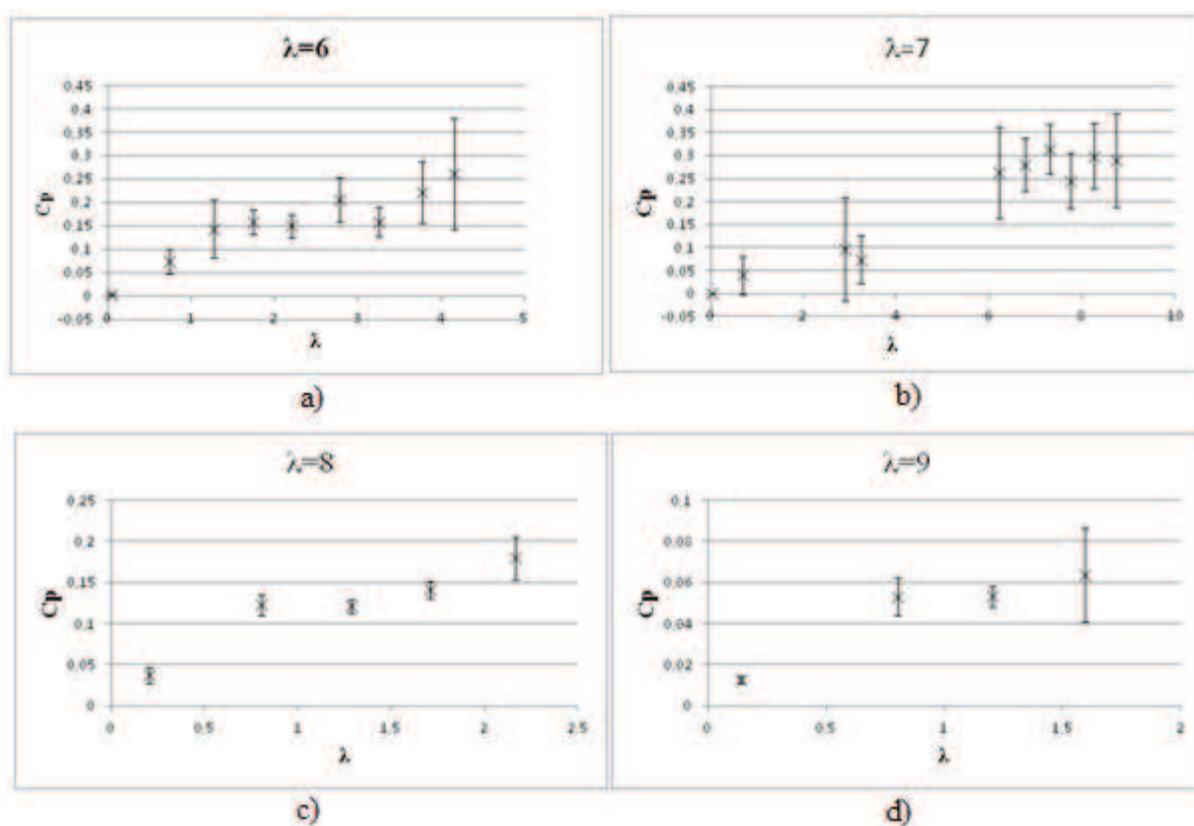


Gráfico 6.4- Curvas de Potência versus λ .

A potência extraída, obtida do produto do torque pela velocidade angular, aumenta conforme o aumento da rotação, porém sendo limitado por efeitos de arraste, bem como efeito de bloqueamento. Para altas rotações o rotor passa a se comportar como um disco sólido, se tornando menos permeável ao ar, provocando assim escoamento radial, reduzindo a passagem de ar pelos perfis e consequentemente a sustentação. Este efeito tridimensional, não previsto na teoria, impede o aumento da velocidade angular.

6.2.2. C_p versus λ Gráfico 6.5- Curvas de C_p versus λ .

De acordo com o BEM espera-se que o C_{pmax} só aumente com o valor de λ de projeto, verifica-se esse fato nos gráficos 6.5 (a) e (b) onde o valor de λ aumenta de 6 para 7. Com o aumento de λ de 7 para 8 e de 8 para 9 nos gráficos 6.5 (b), (c) e (d) os valores de C_{pmax} passam a ter um decréscimo considerável. Os gráficos (c) e (d) relativos às pás de λ iguais a 8 e 9 apresentam um ligeiro acréscimo com o aumento de λ , mas apresentam um baixo coeficiente de potência. Este fato não pode ser atribuído a algum efeito de bloqueamento ou arraste, pois estas não chegam a rodar rápido o suficiente, e nem atingem o regime de projeto, podendo o comportamento ser explicado pelo fato de λ 8 e 9 terem os ângulos e cordas menores, e como o vento dos testes não foi alto, as pás tiveram dificuldades em partir e continuar rodando, caracterizando-se por um baixo desempenho.

Verificou-se dos testes que o maior valor de C_{pmax} ocorreu para a pá projetada com $\lambda=7$, tendo maior eficiência em média quando operando com λ próximo ao de projeto.

7 CONCLUSÃO

O trabalho contemplou o projeto, construção e testes de um conjunto de pás para aerogeradores de pequeno porte. Testes de desempenho foram realizados a partir de um aparato experimental previamente construído, onde se teve a responsabilidade de montagem e organização de todos os instrumentos necessários para aquisição dos dados de campo.

Quatro conjuntos de pás foram testados, estes diferindo pelo valor de λ de projeto, sendo os valores de λ iguais a 6,7,8 e 9. O aparato foi montado e os testes realizados durante os meses de maio e abril de 2012, caracterizados por uma baixa média de velocidade dos ventos, que oscilou neste caso entre $2,98m/s$ e $3,82m/s$.

Nos testes realizados verificou-se a pouca dependência do torque medido em função da velocidade específica de operação, sendo esta uma característica de aerogeradores de alta rotação.

Os resultados dos testes, expressos por curvas características, mostraram que dentre as pás testadas, a $\lambda=7$ apresentou o melhor desempenho, obtendo um valor de $C_{pmax}=0,31$. Verificou-se ainda o melhor desempenho médio da $\lambda=7$ comparada às outras pás dentro do regime de operação próximo ao λ de projeto.

Efeitos aerodinâmicos de bloqueamento e de arrasto estiveram presentes, impedindo que as pás acelerassem mais, principalmente as de λ de projeto 6 e 7, que respondiam melhor às baixas velocidades do vento, uma vez que estas possuem maiores ângulos de torção (acarretando em maiores ângulos de ataque e maiores sustentações nos perfis) e cordas (acarretando em maiores sustentações nos perfis).

As pás projetadas para λ 8 e 9 não tiveram resultados satisfatórios, podendo ser explicados pelo fato de as mesmas não possuírem grandes ângulos de torção e afilamento. Sabe-se que os grandes aerogeradores usam pás projetadas para estas velocidades específicas, contudo a partida das mesmas (a baixas velocidades de vento) é auxiliada por um sistema de torção controlada eletronicamente, o que não é o caso de pequenos aerogeradores, objetos desse estudo, que devem ter sistemas mecanicamente simples de operação, por questões de custos.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, John D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 3ª Edição. Mc Graw Hill, 2001.

BURTON, Tony; SHARPE, David; Jenkins, Nick; BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook**. 1ª Edição. England. John Wiley & Sons Ltd, 2001. p.608.

DURAN, S Eker. **Computer-aided design of horizontal-axis wind turbine blades**. 2005. Disponível em: <<https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12605790/index.pdf>>. Acesso em: 10 junho 2012.

HANSEN, Martin Otto Laver. **Aerodynamic of Wind Turbine**. 2ª Edição. Earthscan United Kingdom. Routledge, 2008.

HAU, Erich. **Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics**. 2ª Edição. Germany. Springer, 2006. p.750.

INGRAM, Grant.. **Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method**. Version 1.0. Durham University. United Kingdom. Disponível em: <https://community.dur.ac.uk/g.l.ingram/download/wind_turbine_design.pdf>. Acesso em: 18 julho 2012.

JANSEN, W.A.M.; Smulders, P.T. **Rotor Design for Horizontal Axis Windmills**. 1977. Disponível em: <https://archive.org/stream/fe_Rotor_Design_for_Horizontal_Axis_Windmills/Rotor_Design_for_Horizontal_Axis_Windmills_djvu.txt>. Acesso em: 12 julho 2012.

LOPES, Alberto dos Santos. **Projeto, desenvolvimento, montagem e testes de uma estrutura de medição de eficiência de pequenos aerogeradores**. 2011. 118f. Dissertação (Mestrado) - Depto de Engenharia Mecânica e de Produção. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

MATHEWS. **Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics**. Faculty of Engineering. KCAET, 2006. Disponível em: <https://www.dolcera.com/wiki/images/Wind_power_energy.pdf>. Acesso em: 20 junho 2012.

MORIART, Philip. **Aerodyn Theory Manual, Windward Engineering**. Salt Lake City. Utah, 2004. Disponível em: <https://nwtc.nrel.gov/system/files/AD_Theory.pdf>. Acesso em: 28 junho 2012.

ANEXOS

ANEXO A - Valores numéricos da geometria das pás

Os elementos geométricos de maior importância na confecção das pás são descritos nas tabelas seguintes, sendo a corda em metros e o ângulo de fluxo e torção em graus.

$\lambda=6$						
raio	r/R	Fi	Beta	c	Solidez	
0,15	0,1	34,48996	28,37996	0,52851	1,6823	
0,2175	0,145	30,64111	24,53111	0,47568	1,04423	
0,285	0,19	26,5376	20,4276	0,417	0,6986	
0,3525	0,235	23,03895	16,92895	0,36527	0,49476	
0,42	0,28	20,19664	14,08664	0,32223	0,36631	
0,4875	0,325	17,90065	11,79065	0,28688	0,28097	
0,555	0,37	16,03168	9,92168	0,25776	0,22175	
0,6225	0,415	14,49226	8,38226	0,23357	0,17915	
0,69	0,46	13,20822	7,09822	0,21326	0,14757	
0,7575	0,505	12,12415	6,01415	0,19603	0,12356	
0,825	0,55	11,19861	5,08861	0,18126	0,10491	
0,8925	0,595	10,40037	4,29037	0,16849	0,09014	
0,96	0,64	9,70559	3,59559	0,15735	0,07826	
1,0275	0,685	9,09585	2,98585	0,14755	0,06856	
1,095	0,73	8,55677	2,44677	0,13887	0,06055	
1,1625	0,775	8,07695	1,96695	0,13114	0,05386	
1,23	0,82	7,64729	1,53729	0,1242	0,04821	
1,2975	0,865	7,26043	1,15043	0,11795	0,04341	
1,365	0,91	6,91036	0,80036	0,11229	0,03928	
1,4325	0,955	6,59212	0,48212	0,10715	0,03571	
1,5	1	6,30161	0,19161	0,10244	0,03261	

Tabela 2- Geometria da pá $\lambda=6$

$\lambda=7$					
raio	r/R	Fi	Beta	c	Solidez
0,15	0,1	33,23387	27,12387	0,43845	1,39561
0,2175	0,145	28,38127	22,27127	0,38027	0,83478
0,285	0,19	24,00389	17,89389	0,32544	0,54521
0,3525	0,235	20,53158	14,42158	0,28058	0,38005
0,42	0,28	17,82449	11,71449	0,24488	0,27839
0,4875	0,325	15,6941	9,5841	0,2164	0,21195
0,555	0,37	13,99022	7,88022	0,1934	0,16639
0,6225	0,415	12,60409	6,49409	0,17457	0,1339
0,69	0,46	11,45833	5,34833	0,15892	0,10997
0,7575	0,505	10,49757	4,38757	0,14575	0,09187
0,825	0,55	9,68159	3,57159	0,13454	0,07786
0,8925	0,595	8,98072	2,87072	0,12488	0,06681
0,96	0,64	8,37268	2,26268	0,11649	0,05794
1,0275	0,685	7,84048	1,73048	0,10913	0,05071
1,095	0,73	7,37098	1,26098	0,10263	0,04475
1,1625	0,775	6,95384	0,84384	0,09686	0,03978
1,23	0,82	6,58089	0,47089	0,09168	0,03559
1,2975	0,865	6,24551	0,13551	0,08703	0,03203
1,365	0,91	5,94236	-0,16764	0,08282	0,02897
1,4325	0,955	5,66704	-0,44296	0,079	0,02633
1,5	1	5,41592	-0,69408	0,07551	0,02403

Tabela 3- Geometria da pá $\lambda=7$

$\lambda=8$					
raio	r/R	Fi	Beta	c	Solidez
0,15	0,1	31,73914	25,62914	0,36824	1,17213
0,2175	0,145	26,25497	20,14497	0,30966	0,67977
0,285	0,19	21,80696	15,69696	0,26004	0,43564
0,3525	0,235	18,4504	12,3404	0,22154	0,30008
0,42	0,28	15,90739	9,79739	0,19186	0,21811
0,4875	0,325	13,94181	7,83181	0,16866	0,16518
0,555	0,37	12,38851	6,27851	0,15018	0,1292
0,6225	0,415	11,13545	5,02545	0,13519	0,10369
0,69	0,46	10,10597	3,99597	0,12283	0,08499
0,7575	0,505	9,24663	3,13663	0,11248	0,0709
0,825	0,55	8,51932	2,40932	0,1037	0,06002
0,8925	0,595	7,8963	1,7863	0,09617	0,05145
0,96	0,64	7,35698	1,24698	0,08964	0,04458
1,0275	0,685	6,88575	0,77575	0,08392	0,039
1,095	0,73	6,47062	0,36062	0,07889	0,0344
1,1625	0,775	6,10225	-0,00775	0,07441	0,03056
1,23	0,82	5,77321	-0,33679	0,07041	0,02733
1,2975	0,865	5,47758	-0,63242	0,06682	0,02459
1,365	0,91	5,21055	-0,89945	0,06357	0,02224
1,4325	0,955	4,96818	-1,14182	0,06062	0,02021
1,5	1	4,74723	-1,36277	0,05793	0,01844

Tabela 4- Geometria da pá $\lambda=8$

$\lambda=9$						
raio	r/R	Fi	Beta	c	Solidez	
0,15	0,1	30,16816	24,05816	0,31269	0,99532	
0,2175	0,145	24,31774	18,20774	0,25623	0,56248	
0,285	0,19	19,91686	13,80686	0,21196	0,35511	
0,3525	0,235	16,71453	10,60453	0,17895	0,24239	
0,42	0,28	14,33813	8,22813	0,15409	0,17517	
0,4875	0,325	12,52487	6,41487	0,13494	0,13216	
0,555	0,37	11,10413	4,99413	0,11984	0,10309	
0,6225	0,415	9,96477	3,85477	0,10767	0,08258	
0,69	0,46	9,0327	2,9227	0,09769	0,0676	
0,7575	0,505	8,25713	2,14713	0,08936	0,05633	
0,825	0,55	7,60232	1,49232	0,08232	0,04764	
0,8925	0,595	7,04246	0,93246	0,07629	0,04081	
0,96	0,64	6,55854	0,44854	0,07107	0,03535	
1,0275	0,685	6,13623	0,02623	0,06651	0,03091	
1,095	0,73	5,76457	-0,34543	0,0625	0,02725	
1,1625	0,775	5,43504	-0,67496	0,05893	0,02421	
1,23	0,82	5,1409	-0,9691	0,05575	0,02164	
1,2975	0,865	4,87677	-1,23323	0,0529	0,01947	
1,365	0,91	4,63832	-1,47168	0,05032	0,0176	
1,4325	0,955	4,42199	-1,68801	0,04797	0,01599	
1,5	1	4,22485	-1,88515	0,04584	0,01459	

Tabela 5 - Geometria da pá $\lambda=9$

ANEXO B - Tratamento dos dados

Os pontos conforme obtidos nas medidas foram separados em intervalos conforme descrito na seção 6.2, e são expressos nas tabelas seguintes, sendo a potência expressa em Watts e o torque em N.m.

$\lambda=6$							
Lambda	Torque	Potência	Cp	Erro Lamb	Erro Torqu	Erro Pot	Erro Cp
0,035283	4,180928	0,311473	0,0036278	0,034879	0,192533	0,309007	0,003665
0,731669	4,231479	6,394478	0,07466256	0,098981	0,175863	2,14276	0,026602
1,27432	4,264365	9,820211	0,14421129	0,093273	0,133309	1,579468	0,062446
1,749838	4,232335	14,19054	0,15864397	0,057	0,132091	1,349039	0,027389
2,196409	4,12951	19,71121	0,14966956	0,064853	0,061553	2,044098	0,025225
2,780357	4,229939	25,31627	0,20569182	0,087008	0,115402	3,492112	0,047751
3,249987	4,265355	36,23598	0,1593588	0,064816	0,061034	2,780677	0,032013
3,773069	4,545378	42,5352	0,22169206	0,1111	0,301914	5,107719	0,065236
4,160795	4,848686	49,5147	0,26197008	0,103029	0,514502	9,169355	0,119227

Tabela 6- Tratamento dos dados $\lambda=6$

$\lambda=7$							
Lambda	Torque	Potência	Cp	Erro Lambd	Erro Torqu	Erro Pot	Erro Cp
0,017778	2,931268	0,110103	0,00070374	0,0095926	0,146449	0,062206	0,000556
0,684023	2,744406	4,535075	0,04009567	0,1142097	0,705317	1,471594	0,041434
2,881666	2,064997	13,24834	0,09747421	0,1801239	1,228856	4,044376	0,113609
3,228356	2,489628	22,95082	0,07411447	0,2921078	1,42785	15,25724	0,051825
6,199666	2,846856	39,77438	0,26334253	0,1322162	0,549743	6,82567	0,099193
6,769883	2,964215	46,04989	0,2805393	0,0775544	0,390491	5,892545	0,058221
7,298185	3,076022	51,26067	0,31461345	0,0629323	0,338164	5,287331	0,054222
7,751057	2,77777	55,2139	0,24528381	0,0864463	0,446088	8,036817	0,060143
8,263643	3,144772	65,27684	0,29852049	0,124745	0,462886	8,230148	0,070786
8,737933	2,9884	65,91472	0,28990095	0,2404892	0,846432	17,54179	0,101858

Tabela 7- Tratamento dos dados $\lambda=7$

$\lambda=8$							
Lambda	Torque	Potência	Cp	Erro Lamb	Erro Torqu	Erro Pot	Erro Cp
0,206751	4,084551	1,148631	0,03695035	0,039452	0,041832	0,225119	0,01013
0,806892	4,018531	4,87953	0,12274957	0,028099	0,038881	0,289169	0,012887
1,287611	3,979321	9,631113	0,12090645	0,017872	0,027958	0,341371	0,008045
1,711713	4,035987	13,9009	0,14096285	0,019917	0,027139	0,503819	0,010499
2,16632	4,088698	17,98578	0,17989395	0,037533	0,039531	1,285164	0,026163

Tabela 8 - Tratamento dos dados $\lambda=8$

$\lambda=9$							
Lambda	Torque	Potência	Cp	Erro Lamb	Erro Torqu	Erro Pot	Erro Cp
0,140214	4,120229	1,146569	0,01268816	0,014215	0,019413	0,147203	0,001861
0,800956	4,022817	7,186723	0,05301422	0,048438	0,042562	0,715912	0,00918
1,203547	3,961083	12,42372	0,05320303	0,033233	0,032041	0,578845	0,005056
1,595538	3,955614	17,58698	0,06346401	0,056173	0,071721	2,288125	0,022818

Tabela 9 - Tratamento dos dados $\lambda=9$