



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

FLÁVIO ROBERTO DE FREITAS GONÇALVES

**MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DE PÁS PARA AEROGERADORES DE
PEQUENO PORTE**

FORTALEZA

2014

FLÁVIO ROBERTO DE FREITAS GONÇALVES

**MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DE PÁS PARA AEROGERADORES DE
PEQUENO PORTE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito para obtenção do Título de Mestre em 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

-
- G626m Gonçalves, Flávio Roberto de Freitas.
 Modelagem e dimensionamento de pás para aerogeradores de pequeno porte / Flávio Roberto de Freitas Gonçalves. – 2014.
 60 f.: il. color.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2015.
 Área de Concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas.
 Orientação: Prof. Dr. Dr. Daniel Albiero.
1. Energia eólica. 2. Simulação computacional. 3. Energia na agricultura. 4. Análise dimensional. I. Título.

FLÁVIO ROBERTO DE FREITAS GONÇALVES

**MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DE PÁS PARA AEROGERADORES
DE PEQUENO PORTE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Agrícola da Universidade
Federal do Ceará, como requisito para
obtenção do Título de Mestre em
Engenharia de Sistemas Agrícolas.

Aprovada em: 30/07/2014.

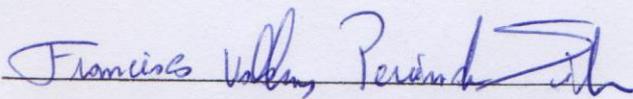
BANCA EXAMINADORA



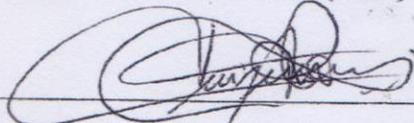
Prof. Dr. Daniel Albiero (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)



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



Prof. Dr. Francisco Valdenor Pereira da Silva
Instituto Federal do Ceará (IFCE)



Prof. Dr. Luiz Antonio Rossi
Univesidade Estadual de Campinas (Unicamp)

Dedico este trabalho aos meus pais, José Gonçalves de Oliveira e Maria Eni de Freitas Oliveira que com seus esforços permitiram a mim e meus irmãos olhar para o alto e contemplar um universo de possibilidades.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA na figura de seu então coordenador professor Dr. José Antônio Delfino Barbosa Filho na promoção da pesquisa e desenvolvimento científico em Engenharia Agrícola, os meus sinceros agradecimentos.

Ao Professor Dr. Daniel Albiero, pela orientação neste trabalho e nas demais pesquisas desenvolvidas durante o curso, minha gratidão.

Aos professores do curso de Mestrado em Engenharia Agrícola que além do respeito e admiração pelo trabalho que exercem também os admiro como pessoas.

Ao Instituto Federal do Ceará – IFCE Campus Fortaleza.

Aos professores do IFCE: Agamenom Goes, George Cajazeiras, Mauro Albuquerque, Fábio Montenegro, José Gledson, Auxiliadora Blum, Waldeci de Lima, Pedro Urbano, Evaldo Mota, Gênova de Castro, Renato Sousa, Cláudio Sá, Rogério Oliveira, Renata Jorge, Antonio Braga e Wally Menezes, meus agradecimentos.

Em especial aos professores Marcos Lemos, Heldenir Pinheiro, Enio Costa, Daniel Gurgel, Alan Vinicius e Achilles Chaves, colegas de trabalho e de mestrado que de forma prestativa, apoiam direta ou indiretamente este trabalho, em destaque ao meu professor e amigo, Prof. Dr. Francisco Valdenor Pereira da Silva

Aos meus ex-alunos do curso de Engenharia Mecatrônica Hericson Regis, Augusto Cesár, Davi Castro Bijotti, Davi Teixeira Barroso, Jaron de Barros Wanderley, Germana Cristina, Felipe Eduardo Luz e demais alunos bolsistas do LMO e LMT pelo apoio na execução dos trabalhos.

Aos e colegas de curso Wesley, Nivanda, Renata, Rafaela, Carla, Rafael, Maria Paula, Evanaldo dentre outros pela paciência, cinergia e convivência.

À minha companheira Jessica Ferreira Araújo pelo apoio e compreensão nas dificuldades enfrentadas, meu reconhecimento.

À minha sogra Fátima Helena, a qual me considera como um filho, meu sincero agradecimento.

“Quando nisto iam, descobriram trinta ou quarenta moinhos de vento, que há naquele campo. Assim que D. Quixote os viu, disse para o escudeiro:

— A aventura vai encaminhando os nossos negócios melhor do que o soubemos desejar; porque, vês ali, amigo Sancho Pança, onde se descobrem trinta ou mais desaforados gigantes, com quem penso fazer batalha, e tirar-lhes a todos as vidas, e com cujos despojos começaremos a enriquecer; que esta é boa guerra, e bom serviço faz a Deus quem tira tão má raça da face da terra.” (

Miguel de Cervantes)

“Quem não sabe o que busca, não identifica o que acha.” (Immanuel Kant)

RESUMO

Grande extensão do Estado do Ceará (cerca de 90% de seu território) é suprida por ventos com velocidade de 3,5 a 5m/s. Nesta mesma extensão do território, encontram-se os assentamentos de agricultores familiares que são responsáveis pela produção da maior parte dos alimentos consumidos em nosso território. Poder-se-ia utilizar para este fim, aerogeradores comerciais de pequeno porte. Porém em sua maioria, possuem curvas características não adequadas (visto não ser para regiões com baixas velocidades de vento). Por não possuírem apoio das indústrias no desenvolvimento de equipamentos específicos para o atendimento da demanda em energia elétrica a estes locais, este trabalho apresenta uma modelagem para projeto de pás para aerogeradores com vistas a utilização em regiões caracterizadas como baixo vento utilizando perfil cambado. Um modelo matemático foi elaborado para o dimensionamento e modelagem das pás de um rotor a partir de dados de velocidades de vento característicos das regiões de assentamentos de agricultores, potência requerida e características específicas do local de instalação gerando parâmetros dimensionais que permitam a fabricação das pás do rotor. A validação do modelo utilizou o software FoilSim para comparativo dos dados gerados pelo modelo. Como forma de refinamento do modelo, propôs-se elaboração de protótipo em escala com uso da metodologia de análise dimensional apresentando coeficientes Pi-terms para este propósito.

Palavras-chave: Modelagem computacional. Energia eólica. Agricultura Familiar. Análise dimensional.

ABSTRACT

The greater extent of Ceará State (about 90% of its territory) is supplied by winds of the order of 3.5 to 5m / s. On the same extent of territory lie the settlements of farmers (responsible for producing most of the food consumed in our territory) are located in these same regions and possess not support the industries in developing specific equipment to meet the demand energy of these, since the application of wind turbines for power generation is not appropriate. We could use for this purpose, small generators that mostly have curves also not appropriate to these sites. This paper presents a model for designing blades for wind turbines with a view to use in areas characterized as low wind using camber profile. A mathematical model was developed for the design and modeling of the blades of a rotor starting data of wind speeds characteristic of regions of settlements of farmers, potency and specific characteristics required for the installation site generating dimensional parameters enabling the manufacture of rotor blades . The validation model used academic software for comparative data generated by the model. As a way to refine the model, we propose preparation of prototype scale using the methodology presented dimensional analysis coefficients Pi-terms for this purpose.

Keywords: Computational modeling. Wind Energy. Family Farming. Dimensional analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Consumo total de energia no mundo, 1990-2040	17
Figura 2 - Demanda Interna de Energia	18
Figura 3 - Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte - 2012.	19
Figura 4 - Oferta Interna de Energia	19
Figura 5 - Mapa de distribuição dos ventos no Nordeste Brasileiro	21
Figura 6 - Mapa de distribuição dos ventos no Ceará	22
Figura 7 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.	24
Figura 8 – Distribuição de c_p em função de V_3/V_1	25
Figura 9 – Característica $C_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações Numéricas	27
Figura 10 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador	27
Figura 11 – Padrões de perfil aerodinâmicos	28
Figura 12 – Forças atuantes em uma pá eólica	28
Figura13 - Teoria do Elemento de pá	30
Figura14 - Modelagem de pá de aerogerador com perfil E61	32
Figura15: Análise Dimensional – ensaio em túnel de vento: a- Escala real, b – Modelo reduzido	33
Figura16 - Aplicativo FoilSim	37
Figura17 - Distribuição das estações coletoras de dados no Ceará	40
Figura 18 – Distribuição de Weibull para os dados de ventos	41
Figura 19 - Relação entre velocidades, ângulos e plano de rotação da pá	44
Figura 20 - Perfil E61	44
Figura 21 - Tela principal do software	46
Figura 22 - Entrada de dados	46
Figura 23 :Fluxograma do modelo computacional.	47
Figura 24 - Geometria da pá(a - corda estimada (m) e b – torção($^{\circ}$)) para velocidades V_1 , V_2 , V_3 e V_4).	53
Figura 25 – Aplicativo FoilSim: a – Painel principal, b-Configuração do perfil, c- Configuração da asa, d – Forças atuantes no perfil.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados característicos de assentamentos de agricultores familiares no Ceará.	38
Tabela 02 - Estações de coleta de dados no Ceará	40
Tabela 03 - Características do vento e distribuição por localidade.	41
Tabela 04 - Dados do perfil E61	44
Tabela 05 - Dimensões primárias para análise dimensional.	48
Tabela 06 - Matriz de equações dimensionais combinando parâmetros para formação de grupos adimensionais	49
Tabela 07 - Matriz de resolução das equações para obtenção de grupos adimensionais.	50
Tabela 08 - Parâmetros de entrada utilizados na modelagem	51
Tabela 09 - Valores calculados pelo modelo computacional: a- $V1=1$ m/s.)	51
Tabela 10 - Valores calculados pelo modelo computacional: a- $V2=2$ m/s.)	52
Tabela 11 - Valores calculados pelo modelo computacional: a- $V3=3$ m/s.)	52
Tabela 12 - Valores calculados pelo modelo computacional: a- $V4=4$ m/s.)	52
Tabela 13 - Dados obtidos com uso do aplicativo FoilSim para velocidades $V1$, $V2$, $V3$ e $V4$	54
Tabela 14 - Valores de sustentação: a - Pelo modelo, b - oriundos do FoilSim. (valores em Newton)	54
Tabela 15 - Valores de Torque calculados: a - Pelo modelo, b - Por cálculo com valores oriundos do FoilSim	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEM	Blade Element Momentum
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
MAC	Mean Aerodynamics Chord
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
TSR	Tip Speed Ratio

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Fator de interferência axial
a'	Fator de interferência tangencial
A	Área do disco do rotor de aerogerador
B	Número de pás
c	Corda de elemento de pá
C_d	Coefficiente de arrasto de um perfil aerodinâmico
C_l	Coefficiente de sustentação de um perfil aerodinâmico
C_p	Coefficiente de potência
D	Força de arrasto
F	Fator de correção de perdas
L	Força de sustentação
N	Número de elementos da pá
P	Potência eólica
PE	Potência extraída
Q	Torque tangencial
r	Posição radial em relação ao rotor
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	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	Rotação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURAe	17
2.1 - Energia eólica	17
2.2 - Energia eólica no Brasil	18
2.3– Situação atual das energias renováveis no contexto da agricultura familiar	20
2.4 – Energia e potência Extraída do Vento	22
2.5 – Características aerodinâmicas de pás	27
2.5.1 - Características do aerofólio da pá	27
2.5.2 - Teoria do elemento de pá	30
2.6 – Representação estatística do regime dos ventos	30
2.6.1 – Distribção de Weibull	31
2.6.2 – Distribção de Rayleigh	32
2.7 - Análise Dimensional	33
2.8 – Softwares de modelagem e simulação	37
2.8.1 - FoilSim	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	38
3.1. Coleda de dados	38
3.1.1 – Dados de assentamentos de agricultura familiar	38
3.1.2 – Dados de perfil de ventos	39
3.2 Dimensionamento de rotores	42
3.2.1 – Ferramenta de modelagem	45
3.2.2 – Elaboração parâmetros de verificação de protótipo em análise dimensional	48
4 RESULTADOS	51
4.1 – Apresentação dos resultados	51
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	55
5.1 – Validação dos resultados	55
6 CONCLUSÃO	58
7 REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A participação da agricultura familiar no agronegócio brasileiro é responsável pela produção da maior parte dos alimentos consumidos em nosso território.

No Brasil, a agricultura familiar é sem dúvida um segmento importante do setor agrícola, tanto em relação ao volume de produção quanto em geração de emprego e renda. Dados do Ministério do Desenvolvimento Agrário revelam que 77% da ocupação de mão de obra no campo são representadas pela agricultura familiar, e estas são responsáveis pela produção de alimentos que compõem a dieta da população brasileira (BRASIL, 2002, p. 2).

A agricultura familiar pode ser entendida como o cultivo da terra realizado por pequenos proprietários rurais, tendo como mão de obra essencialmente o núcleo familiar.

Agricultura familiar gera mais de 80% da ocupação no setor rural e responde no Brasil por sete de cada 10 empregos no campo e por cerca de 40% da produção agrícola.

No Brasil, a agricultura familiar é responsável pela produção de 87% da produção nacional de mandioca, 70% da produção de feijão, 46% do milho, 38% do café, 34% do arroz, 21% do trigo e, na pecuária, 60% do leite, 59% do plantel de suínos, 50% das aves e 30% dos bovinos.

De acordo com o último Censo Agropecuário, a agricultura familiar responde por 37,8% do valor bruto da produção agropecuária. De acordo com a Secretaria de Agricultura Familiar, aproximadamente 13,8 milhões de pessoas trabalham em estabelecimentos familiares, o que corresponde a 77% da população que se ocupa da agricultura. (I-UMA, 2014, [www. http://i-uma.edu.br/blog/2013/05/a-importancia-da-agricultura-familiar-no-desenvolvimento-dos-municipios/](http://i-uma.edu.br/blog/2013/05/a-importancia-da-agricultura-familiar-no-desenvolvimento-dos-municipios/)).

A agricultura familiar exerce importante papel no desenvolvimento social devido a redução das desigualdades regionais promovendo o crescimento e a produção da maior parte dos alimentos que são consumidos nas mesas e contribuindo com a geração de emprego e renda, reduzindo o êxodo rural.

Ponto sensível em qualquer setor, a utilização de energia elétrica e a crescente demanda em consumo de energia eleva o custo da energia elétrica para o uso do agricultor familiar.

“A crise no nível de água nos reservatórios, neste começo de ano – e suas consequências tanto para abastecimento humano como para geração de energia -, torna necessário que se pense e discuta o tema, tanto no âmbito do clima quanto no da matriz energética nacional.” (Bley, 2014, <http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=30086&secao=Colunas%20e%20Artigos&c2=Biog%E1s>).

Ainda de acordo com Cícero Bley (2014),

A partir daí, uma das conclusões lógicas é de que será muito conveniente expandir a microgeração distribuída de energia. Além de eliminar a vulnerabilidade a fatores como o clima, a microgeração é peça fundamental para o desenvolvimento localizado – como já se comentou em newsletter anterior, a propósito dos projetos de geração de energia a partir do biogás resultante de dejetos de animais, em franca evolução no Paraná. Libertam o proprietário rural da conta de energia e ainda lhe permitem vender o excedente. Dispensam implantar linhas de transmissão de energia extensas e caras, nas quais as perdas são muito fortes. O mesmo raciocínio pode ser válido em parte para a implantação de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), que também evitam muitos inconvenientes.

Uma das alternativas seria a utilização da energia eólica para suprimento da demanda.

A energia eólica além de ser renovável e ambientalmente limpa, apresenta, pelo menos, três fatores simultâneos que justificam uma atenção especial, visando a efetivá-la como fonte complementar à geração hídrica no parque gerador brasileiro: (i) o vasto potencial eólico nacional; (ii) sua distribuição geográfica se estende, também, pelo interior do país em áreas socialmente carentes; (iii) a possibilidade de complementação da energia produzida pela geração eólica com as hidrelétricas (EPE, 2009, p. 95).

No entanto, a maior extensão do Estado do Ceará é suprida por ventos da ordem de 3,5 a 5 m/s. Esta característica de perfil de ventos, torna inviável a produção comercial de energia visto que os equipamentos requeridos para esta produção necessitam de ventos com velocidades acima de 7 m/s, com geração da potência nominal em 12 m/s conforme curva de potência característica destes equipamentos além dos altos custos envolvidos na implantação de parques eólicos (custo da ordem de milhões de reais).

O objetivo deste trabalho é a elaboração de um modelo computacional a ser implementados em linguagem de programação que forneça parâmetros dimensionais (geométricos) que permitam a construção de pás para rotor eólico aplicáveis às condições de baixo vento (velocidades entre 3,5 e 5 m/s) e com rendimento aceitável (coeficiente de potência da ordem de 0,35 a 0,40) e que possam ser produzidas com custo adequado para a agricultura familiar.

Para obtenção destes serão efetuadas as seguintes etapas:

- Caracterizar o perfil energético dos assentamentos familiares (demandas energéticas, perfil de ventos, população, renda e demais dados locais).

- Definir de parâmetros para o projeto de rotores eólicos (variáveis de entrada, aerodinâmica de perfis, características de projeto de rotores eólicos.).
- Elaborar modelo matemático de rotor para geradores eólicos em função de parâmetros de entrada.
- Codificar o modelo matemático em linguagem de computador para geração de parâmetros geométricos das pás de rotores.
- Validar parâmetros gerados pelo modelo através de simulação.

Conceitualmente, um modelo matemático ou simplesmente modelo, pode ser apresentado como uma representação de um sistema real, o que significa que um modelo deve representar um sistema e a forma como ocorrem as modificações no mesmo (SODRÉ, 2007, p. 3) .

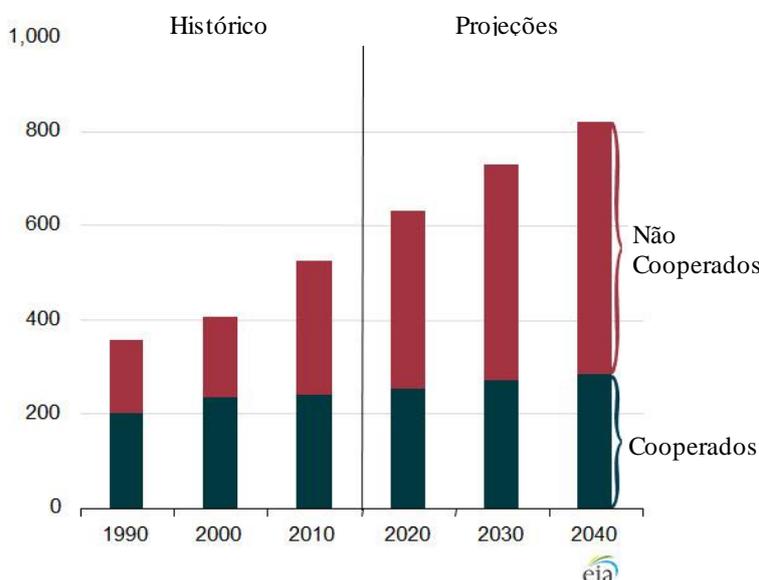
Um modelo matemático para o dimensionamento de pás de rotor eólico permite calcular valores construtivos das pás do rotor adequados a obtenção do melhor rendimento, para diferentes parâmetros de entrada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 - Energia eólica

A energia eólica é a transformação da energia dos ventos em energia útil capaz de gerar inúmeras aplicações e que vem sendo explorada expandindo fronteiras tanto técnicas quanto econômicas no cenário mundial da geração de eletricidade. Este cenário demonstra uma crescente demanda de consumo com uma projeção de consumo em 2040 acima de 800 quadrilhões de Btus conforme a Figura 1.

Figura 1 - Consumo total de energia no mundo, 1990-2040 em Qbtu



Fonte: EIA – Energy Information Administration.(2014)

Sua utilização está presente em diferentes períodos importantes da humanidade remontando aos egípcios (3000 a.C) na propulsão de barcos ao longo do rio Nilo e promovendo o desenvolvimento da navegação e da descobertas dos novos continentes.

Mesmo com seu crescente percentual de utilização, correspondia em 2012 a somente 1% do total mundial sendo a a sua utilização de grande benefício no controle e redução de emissão de gases estufa, já que tem índices praticamente nulos.

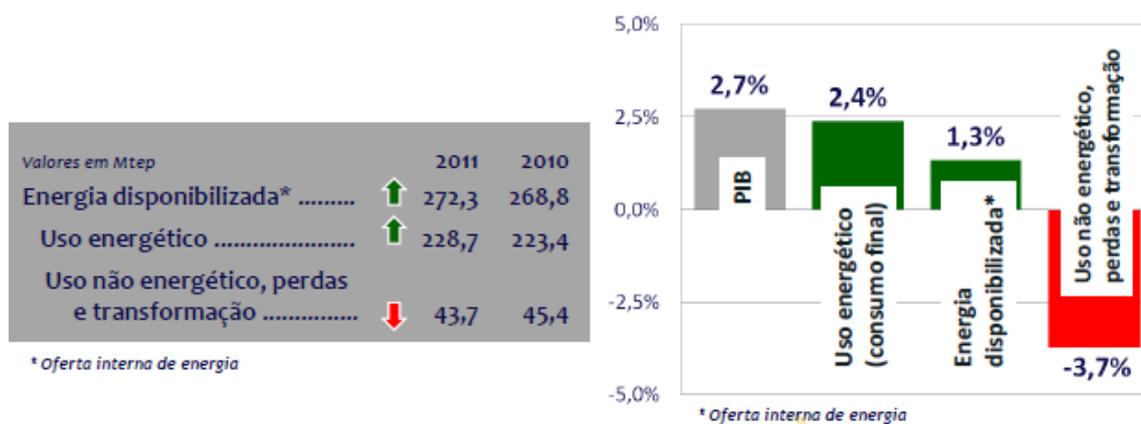
A energia eólica deriva da energia do sol. Parte da radiação solar é convertida em energia cinética, devido à diferença de radiação em altas e baixas latitudes.

Segundo Silva (2013, p. 2) estudos demonstram que o potencial eólico global excede a demanda por energia, mesmo assim, espera-se que somente 9 a 12% da capacidade elétrica global seja fornecida por energia eólica em 2050.

2.2 - Energia Eólica no Brasil

Nos dias atuais, a crescente demanda em consumo de energia elétrica no país apresentada na Figura 2 em face da redução de recursos das fontes tradicionais de geração de energia, vem elevando o custo de produção e em decorrência o custo operacional do uso da energia elétrica.

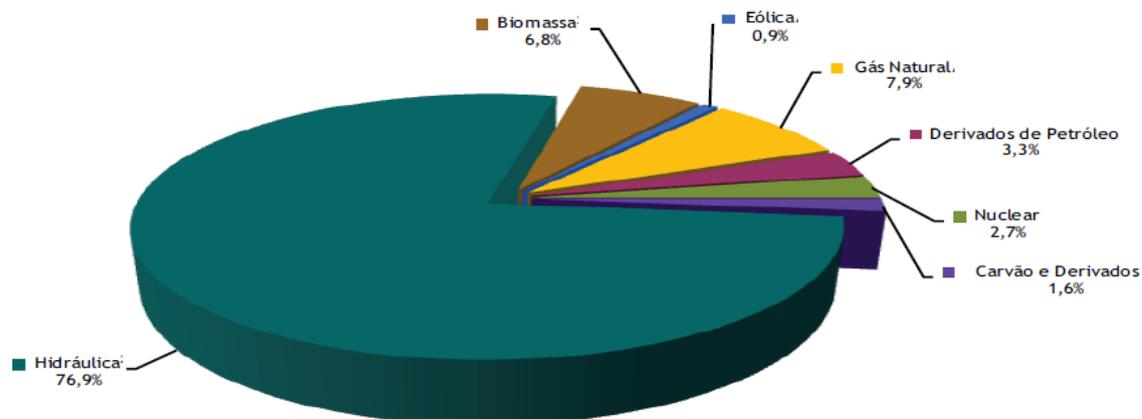
Figura 2 - Demanda Interna de Energia.



Fonte: Balanço Energético Nacional (2012)

O potencial eólico do Brasil é estimado em cerca de 300GW, porém a capacidade instalada em 2012 era de apenas 2,4GW, menos de 1% do potencial brasileiro conforme apresentado na Figura 3 concentrando-se principalmente no nordeste do país.

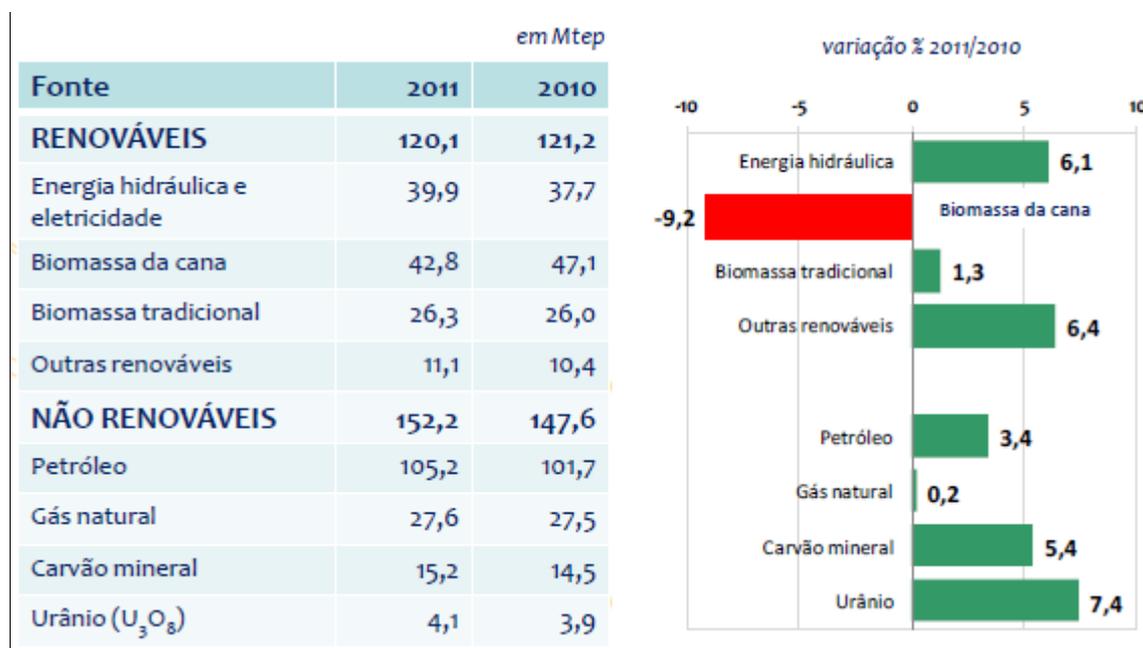
Figura 3. Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte - 2012.



Fonte: Adaptado de Balanço Energético Nacional 2013

Energias renováveis estão em foco nos dias atuais devido a esta crescente demanda de consumo de energia elétrica e também pela necessidades de redução de impactos ambientais provocados pelas fontes convencionais (Figura 4).

Figura 4. Oferta Interna de Energia.



Fonte: Balanço Energético Nacional 2011.

2.3– Situação atual das energias renováveis no contexto da agricultura familiar

Dentre as diferentes fontes renováveis de energia pode-se considerar como de maior relevância a energia solar e a energia eólica, que assumem grande importância na substituição da energia elétrica convencional mesmo em condições mais ermas, visto a necessidade de uma infra estrutura de abastecimento de insumos em bio massa ou gás para as demais fontes, sem contar os impactos ambientais destas outras.

Em virtude do alto custo de instalação e manutenção da geração de energia solar, a utilização de energia eólica, por meio de aerogeradores, se torna, economicamente, mais viável.

No entanto, ainda não atendem ao apelo ambiental, visto que boa parte dos aerogeradores comerciais de baixo custo são produzidos com materiais poluentes e de difícil degradação (por exemplo a fibra de vidro).(in: www.aerogeradores.org)

Com efeito, Albiero (2010) defende que a agricultura familiar no Agronegócio brasileiro é responsável pela produção da maior parte dos alimentos consumidos em nosso território. A dura realidade enfrentada por esta categoria de trabalhadores, que ainda não possuem o apoio por parte da indústria no desenvolvimento de equipamentos para este setor, o que é um fator limitante para o seu desenvolvimento.

Percebemos a necessidade de dotar este segmento de mecanismos que permitam a eficiência e a redução de custos de operação. Um dos pontos sensíveis em qualquer setor, não diferentemente na agricultura familiar, temos a utilização de energia elétrica.

Albiero (2010) sustenta que o acesso do agricultor familiar a um sistema de geração de energia adequado as condições de sua região que fosse menos impactante ao meio ambiente e que diminuíssem seus custos operacionais seria um grande auxílio ao desenvolvimento da agricultura familiar.

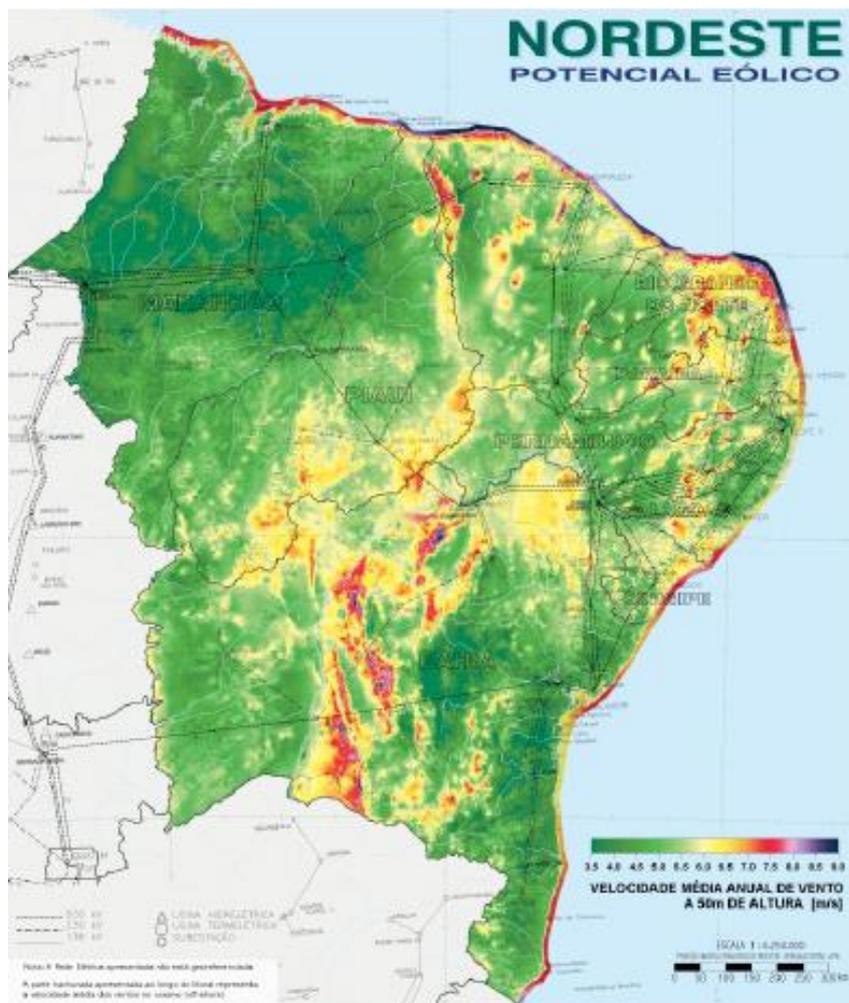
O baixo poder aquisitivo dos agricultores familiares é a principal causa deste fato, visto que a mecanização agrícola exige um nível econômico mínimo para se poder adquirir, operar e fazer a manutenção dos equipamentos utilizados para o cultivo, semeadura, e colheita de produtos agropecuários. Esta situação gera uma defasagem muito grande entre as pequenas e grandes propriedades, principalmente em relação a eficiência do trabalho na produção o que perfaz um ciclo onde a agricultura familiar mal consegue produzir para sua própria subsistência, assim ela perde a oportunidade de se inserir nas grandes cadeias produtivas do Agronegócio Brasileiro (ALBIERO, 2010).

A energia eólica tem sido usada a milhares de anos, em diversas aplicações, como na moagem de grãos e em bombeamento de água, mas a sua utilização para geração de energia elétrica tem sido feita desde o final do século XIX, quando pequenas máquinas eólicas foram criadas para carregar baterias. (CRESESB, 2006).

A energia eólica obtida via aerogeradores em larga escala se dá pela implantação de parques eólicos de grande porte como por exemplo, os implantados na região Nordeste, concentrados nas regiões litorâneas visto a distribuição dos ventos destas regiões (In : www.G1.com).

Pode-se ver, conforme mapa apresentado na Figura 5, a distribuição dos tipos de vento em toda a Região Nordeste.

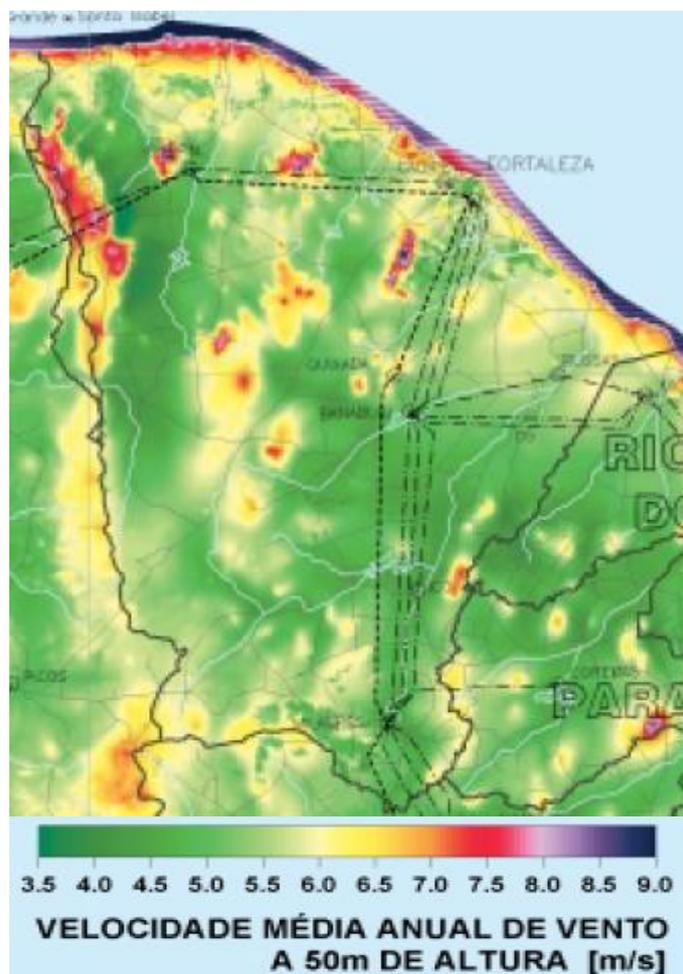
Figura 5. Mapa de distribuição dos ventos no Nordeste Brasileiro



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro 2012

Conforme o mapa apresentado na Figura 6, a distribuição das velocidades dos ventos no estado do Ceará, vee-se nas regiões litorâneas ventos com velocidade características acima de 7 m/s, necessitado de equipamentos de médio e grande portes com alto valor comercial agregado(da ordem de milhões de reais).

Figura 6. Mapa de distribuição dos ventos no Ceará.



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro 2012

Este tipo de equipamento se torna inadequado quando de sua instalação em regiões de ventos entre 3 e 5 m/s, característico das regiões de interior onde se concentram o maior contingente de produtores em regime de agricultora familiar.

2.4 – Energia e Potência Extraída do Vento

Uma turbina eólica capta um aparte da energia cinética do vento e a transforma em energia elétrica. Esta energia cinética é dada por:

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

onde

E energia eólica;
 m massa de ar em movimento;
 V velocidade do vento.

Considerando essa mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade V pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção A , transversal ao fluxo de ar, é dada por:

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

Onde:

P = potência do vento [W]
 ρ = massa específica do ar [kg/m³]
 A = área da seção transversal [m²]
 V = velocidade do vento [m/s]

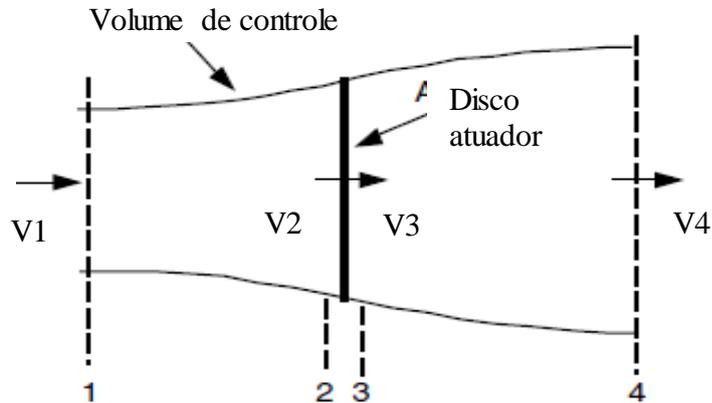
A equação 2 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência D_P , ou fluxo de potência:

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

Manwell (2009) demonstra que ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através 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 rotor.

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 $V1$ representa a velocidade do vento na região anterior às pás, $V2$ a velocidade do vento no nível das pás e $V3$ a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.



Fonte: Manwell(2009)

Na Figura 7, assume-se 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. Conforme Burton (2001), pela lei da continuidade, temos que:

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

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:

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

Onde:

E_{ex} = energia extraída e

m = massa de ar

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

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

\dot{E}_{ex} = Fluxo de energia extraída e

\dot{m} = *fluxo massico*

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:

$$\dot{m} = \rho AV_2 \quad (7)$$

Pelo teorema de Rankine-Froude, pode-se assumir que a relação entre as velocidades V_1 , V_2 e V_3 é dada por:

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

Manwell (2009) afirma que se a massa de ar apresentada na equação 7 e a velocidade V_2 apresentada na equação 8 forem inseridas na mesma equação 6, tem-se:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho AV_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_3}{V_1} \right] \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (9)$$

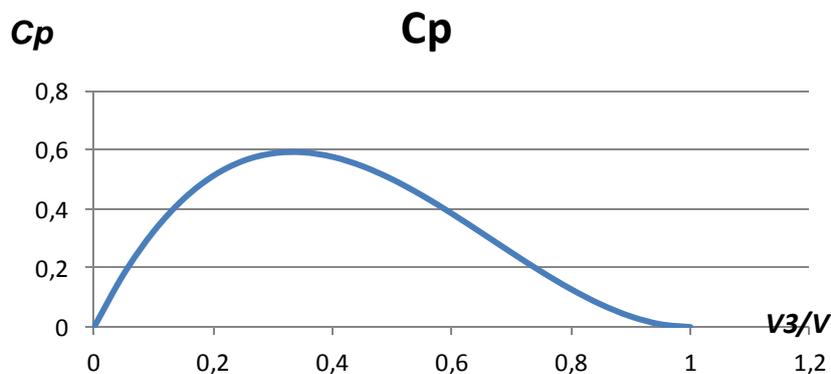
Onde:

$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho AV_1^3 \text{ e}$$

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

A Figura 8 mostra a o coeficiente de potência CP em função da razão V_3/V_1 .

Figura 8 – Distribuição de cp em função de V_3/V_1



Fonte: Adaptado de Manwell(2009)

Ainda de acordo com Burton (2001), ao considerar o Coeficiente de Potência C_p em função de V_3 / V_1 temos que:

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

onde $V_3 / V_1 = 1/3$.

A potência mecânica extraída do vento pelo aerogerador depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos, o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações 11 e 12. (PAVINATTO, 2005). A Figura 9 apresenta o coeficiente de potência em função de diferentes lambdas e betas.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V^3 w C_p(\lambda, \beta) \quad (11)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{V_w} \right) \quad (12)$$

Onde:

C_p – coeficiente de potência do aerogerador

λ – razão entre a velocidade da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (TSR)

ω_{wt} – velocidade angular do rotor [rad/s]

R – raio do rotor [m]

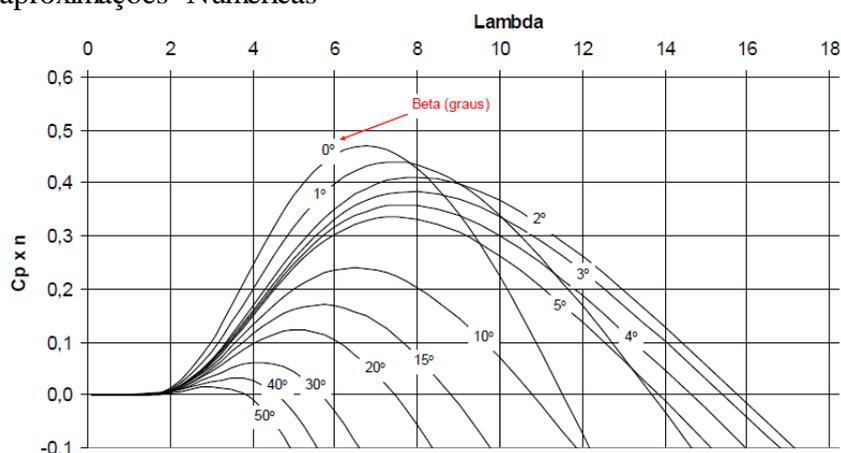
ρ – densidade do ar [Kg/m³]

A – área varrida pelo rotor [m²]

v_w – velocidade do vento incidente no rotor [m/s]

β – Ângulo de torção

Figura 9 – Característica $C_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações Numéricas



Fonte: PAVINATTO, 2005

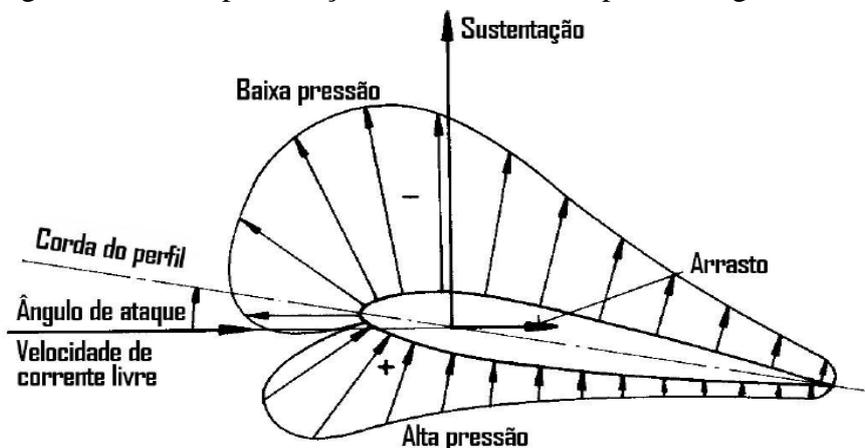
Na equação 11, o coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$ depende das características do aerogerador, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo β das pás (pitch) do aerogerador. O $C_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional.

2.5 – Características aerodinâmicas de pás

2.5.1 - Características do aerofólio da pá

Um aerofólio é um perfil aerodinâmico projetado para gerar forças quando submetido ao escoamento de um fluido. A Figura 10 apresenta um perfil típico. Os principais parâmetros a serem analisados são: o ângulo de ataque, a força de sustentação que é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pelo aerofólio, o arrasto produzido na mesma direção do fluxo, assim como as pressões de intra e extra dorso.

Figura 10 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador

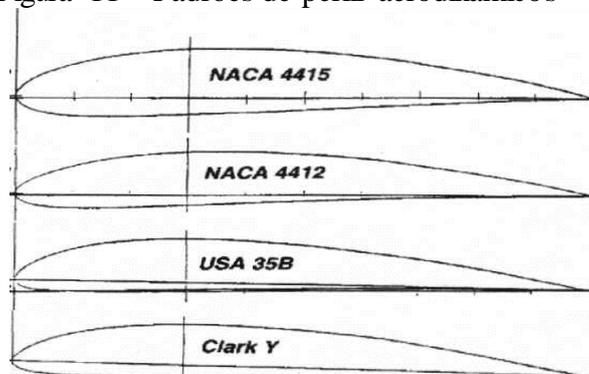


Fonte: Wenzel (2007)

Com o desenvolvimento de asas em composite e alumínio, foi possível passar a utilização de perfis de fluxo laminar, que tem como característica básica uma redução da resistência aerodinâmica(Arrasto), mantendo praticamente o mesmo C_L (Sustentação), e normalmente um C_m (Momento) também menor.

Dos diferentes padrões de aerofólios apresentados na Figura 11o Clark Y tem uma espessura máxima de 11.6 % da MAC (Corda Média Aerodinâmica), o USA 35B tem uma espessura de 11.7% da MAC, o NACA 4412 tem uma espessura de 12% da MAC, e o NACA 4415 tem uma espessura de 15% da MAC. A menor espessura se traduz normalmente em um menor arrasto (*Drag*), porém uma maior espessura torna possível uma estrutura da asa mais leve para uma mesma resistência estrutural.

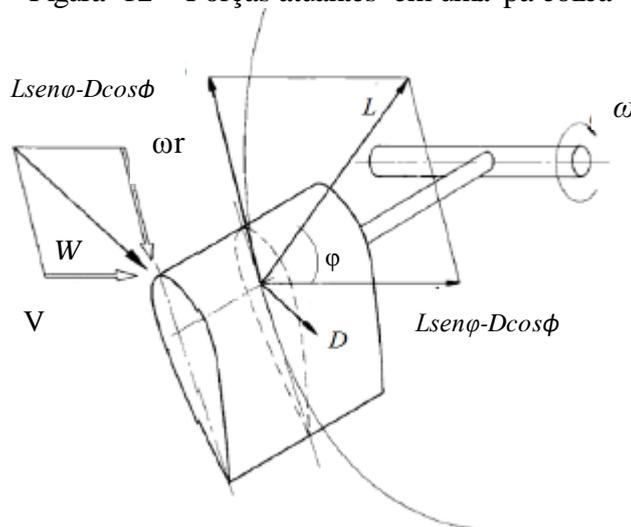
Figura 11 – Padrões de perfil aerodinâmicos



Fonte: Hilton (2014)

Em um aerogerador estas forças estão expressas conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Forças atuantes em uma pá eólica



Fonte: Adaptado de Montezano (2008)

Onde:

D– Arrasto;

L - Sustentação;

V– Velocidade do vento;

ωr – Velocidade tangencial;

φ – Ângulo de Pitch;

W – Velocidade resultante.

A velocidade resultante é obtida pela subtração vetorial da velocidade do vento incidente (\mathbf{V}) com a velocidade tangencial (ωr), conforme a equação 13.

$$W = V - \omega r \quad (13)$$

Segundo Manwell (2009), as forças dF_L e dF_D apresentadas nas equações 14 e 15, representam o diferencial de sustentação (C_l) e de arrasto (C_d) aplicados a uma seção dr da pá respectivamente.

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (14)$$

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (15)$$

As forças dF_N e dF_T Representam as forças norma e tangencial a uma distância r do centro do rotor.

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi \quad (16)$$

$$dF_D = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi \quad (17)$$

Logo, o diferencial de torque dQ de uma força tangencial operando a uma distância r do centro do rotor corresponde a:

$$dQ = Br dF_T \quad (18)$$

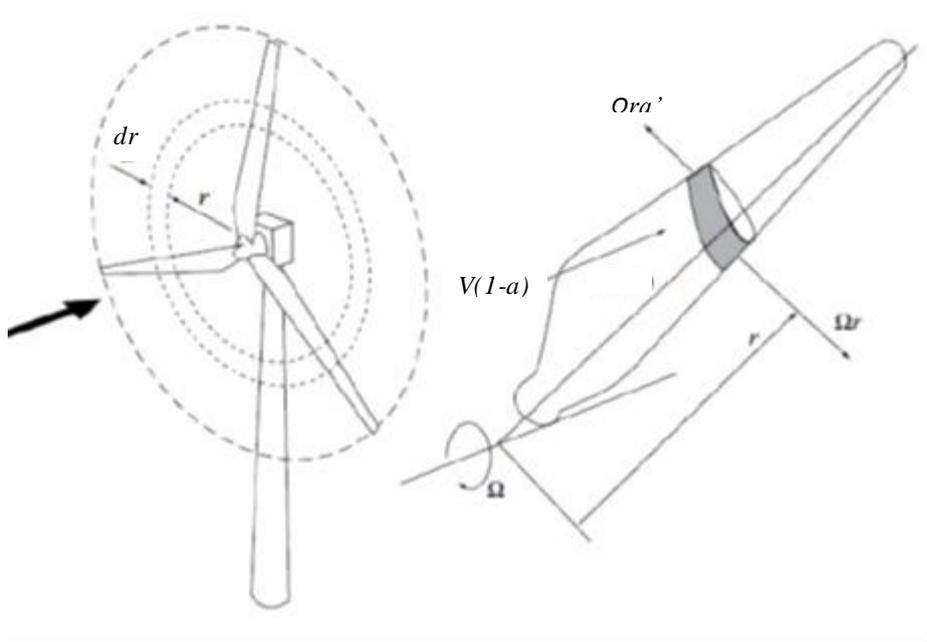
Onde:

B– Número de pás do rotor;

2.5.2 - Teoria do elemento de pá

Para efeito de projeto de pás, utiliza-se da teoria do elemento de pá onde divide-se a pá em N partes iguais, de comprimento dr (diferencial de raio), analisando-as separadamente. Como apresentado na Figura 13, assume-se que a força atuante em cada seção pode ser calculada por meio das características bidimensionais do aerofólio utilizado, C_d e C_l , de acordo com o ângulo de ataque formado pela velocidade resultante incidente no plano de seção transversal do elemento de pá. O ângulo de ataque pode ser determinado por meio das componentes $V(1-a)$ - velocidade axial do vento - os fatores de fluxo (a e a') e a velocidade de rotação Ωr para uma dada posição radial r da pá.

Figura13 - Teoria do Elemento de pá



Fonte: Adaptado de Burton (2001).

2.6 – Representação estatística do regime dos ventos

Segundo Santos (2003), com as variações climáticas sendo freqüentes a cada período do ano, a velocidade do vento também varia seu perfil ao longo do ano. Para uma análise confiável do regime do vento utiliza-se as grandezas: velocidade média \bar{V} e

desvio padrão σ . Através de parâmetros estatísticos o uso de distribuição de probabilidades analisa-se a ocorrência de ventos com uma velocidade específica.

Para fins práticos, a função densidade de probabilidade $g(V)$ deve satisfazer os seguintes requisitos:

- O gráfico gerado deve representar o mais aproximado possível, o histograma da distribuição dos ventos.
- A função de probabilidade deve ser de fácil associação ao regime de velocidade de ventos que se deseja simular.

Das diversas distribuições estatísticas existentes, as distribuições de Weibull e Rayleigh são as mais utilizadas para este fim.

2.6.1 – Distribuição de Weibull

Ainda Segundo Santos (2006), como a velocidade dos ventos não é constante, temos que saber quantas vezes durante um intervalo de tempo medido ocorre uma velocidade específica (ex.: 3 m/s). A distribuição de weibull é o tratamento estatístico mais aplicado em análise de histogramas relativos ao comportamento e a estimativa de produção anual.

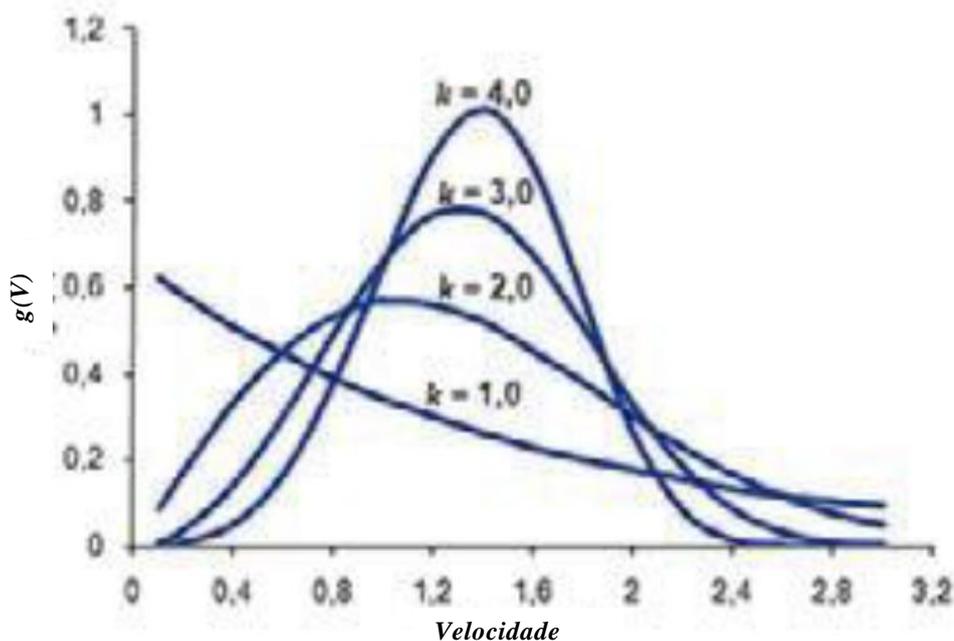
É normalmente representada através de parâmetros definidos como fator de forma da distribuição dos ventos (k) fator de escala (c) que depende da velocidade média dos ventos.

A função densidade de probabilidade de Weibull é definida como:

$$g(V) = \left(\frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \right) \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (18)$$

A distribuição de Weibull fornece uma indicação da uniformidade da distribuição. A Figura 14 apresenta uma distribuição de típica de ventos utilizando diferentes fatores de forma.

Figura14 - Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2014).

2.6.2 – Distribuição de Rayleigh

A função densidade de probabilidade de Rayleigh necessita apenas do conhecimento da velocidade média com boa representatividade do regime de vento.

A função densidade de probabilidade de Rayleigh é definida como:

$$g(V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{\bar{V}^2} \right) \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right] \quad (19)$$

Onde \bar{V} é a velocidade média do vento.

A utilização da distribuição de Rayleigh se dá pela simplicidade porém possui limitações principalmente para velocidades de vento altas.

2.7 - Análise Dimensional

Análise dimensional é uma metodologia para simplificação de um problemas físicos que por meio da homogeneidade dimensional permitindo reduzir o número das variáveis de análise (ALBIERO, 2006).

Com o uso de Análise dimensional podemos apresentar e interpretar dados experimentais, sem a necessidade de se resolver problemas complexos com solução analítica sem perdas significativas das características físicas do fenômeno.

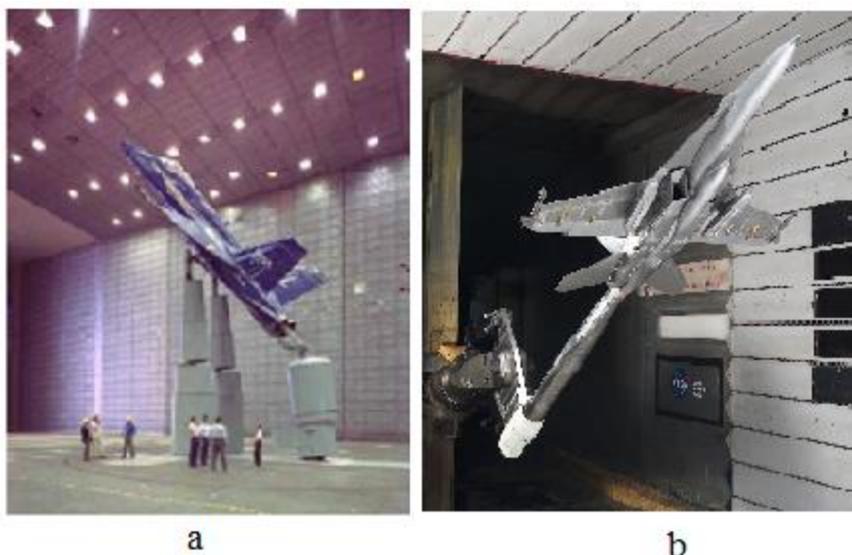
LANGHAAR (1951) apud MACIEL(1993), descreve que a análise dimensional trata das formas gerais das equações que descrevem os fenômenos naturais.

MACIEL (1993) provou que a análise dimensional:

“Estabelece qualitativamente a identificação dos parâmetros que influenciam no fenômeno de preparo do solo, assim como determina quantitativamente a ocorrência do interrelacionamento dos parâmetros estabelecidos para este fenômeno.”

A Figura 15 mostra um exemplo de ensaio de aeronave em escala real, e ensaio análogo com modelo reduzido utilizando-se análise dimensional.

Figura15: Análise Dimensional – ensaio em túnel de vento:
a- Escala real, b – Modelo reduzido



Fonte: Adaptado de NASA (2014)

Segundo MURPH (1950) citado por MACIEL (1993), o conceito de similitude é válido baseado em duas hipóteses:

1-Algumas variáveis do sistema são independentes e todas as outras, exceto as dependentes são redundantes;

2- tanto o modelo como o protótipo são governados pelas mesmas leis físicas.

Propriedade essencial para a análise dimensional é o conceito de independência de conjuntos. Segundo APOSTOL (1968), um conjunto de elementos considerado como um espaço, ou sub-espaço linear S é chamado de dependente se existir um conjunto finito de distintos elementos em S , ditos x_1, \dots, x_k , e um correspondente conjunto de escalares ditos c_1, \dots, c_k , não zeros, tais que respeitem a relação abaixo .

$$\sum_{i=1}^k c_i * x_i = 0 \quad (20)$$

Se para todas as escolhas de distintos valores de x em S , os escalares c são iguais a zero, diz que o espaço ou sub-espaço S é independente linearmente (APOSTOL, 1968).

MACIEL (1993) em extensa revisão (FREITAG et al. (1970), SCHAFER et al.(1971), BARNES (1960), GHOSH (1976), VERMA e SCHAFER (1971), WADHWA (1980), WISMER et al. (1976), JOHNSON et al. (1980), e THAUR e GODWIN (1989)), descreve que tanto a aerodinâmica (aviões) como a hidrodinâmica (navios) utilizam extensamente a análise dimensional, além de estudos de fenômenos de transporte (condução de calor) e mecânica dos fluídos (condução de líquidos), não somente em modelos em escala, mas também em cálculos computacionais avançados, este fato se deve principalmente a: complexidade extrema dos modelos tratados e pelo nível de interesse e apoio (técnico e financeiro) destas áreas.

MACIEL (1993) esclarece que a análise dimensional é um método de dedução lógica dos grupos de variáveis envolvidas em um processo, aplicando conhecimentos básicos de álgebra linear em espaços e subespaços lineares independentes com dimensões coerentes dimensionalmente, que se fundamenta em dois axiomas principais: 1- somente existe um estado de igualdade entre duas grandezas que tenham as mesmas dimensões (princípio da homogeneidade); 2- a razão entre duas grandezas é independentes da unidade em que são medidas, desde que empregue a mesma unidade para ambas.

A análise dimensional para ser válida tem que respeitar as definições e axiomas fundamentais da álgebra linear. Sendo uma metodologia de cálculo que se insere nos conceitos de espaços e sub-espaços lineares, esta deve respeitar os seguintes axiomas fundamentais da álgebra:

Segundo LANGHAAR (1951), a análise dimensional é um método que deduz informações sobre fenômenos físicos através da premissa simples de que o fenômeno

pode ser descrito por equações entre certas variáveis corretas dimensionalmente, basicamente é constituído de dois passos:

- 1 escolha das variáveis importantes para o fenómeno, e determinação das variáveis independentes e das variáveis dependentes, o que requer conhecimento sobre o fenómeno natural;
- 2 formação dos conjuntos completos de produtos adimensionais das variáveis envolvidas, configurando um conjunto de equações algébricas lineares e homogêneas.

Segundo SZUCS (1980) a simetria é uma propriedade essencial das equações, sendo que todas as equações seguem uma regra fundamental em todos os ramos das ciências, basicamente são derivadas de três categorias:

- eventos;
- leis da natureza;
- princípios de simetria.

Esta ultima categoria rege as leis da natureza que explicam os eventos. Esta simetria requer que seja respeitado o princípio de FOURIER: “todos os termos de uma equação física devem ter as mesmas dimensões.” Este princípio é chamado de princípio da homogeneidade.

Em linhas gerais o princípio da homogeneidade gera após adequada manipulação algébrica, quantidades adimensionais que não variam com as transformações realizadas por metodologias de similaridades de modelos matemáticos de um sistema, estas quantidades são denominadas de invariantes de similitude, portanto para qualquer conjunto de sistemas similares devem ter adimensionais comuns que não variam, sendo um critério de validade entre o modelo proposto e o fenómeno (SZUCS, 1980), estes invariantes são chamados de Pi-Termos (pn).

Para que o fenómeno estudado seja completamente explicado por um modelo matemático gerado por análise dimensional, é essencial que o conjunto invariantes (produtos (multiplicações) de adimensionais) seja completo. LANGHAAR (1951) defini conjunto de produtos de adimensionais completo como aquele que dadas variáveis são completas se cada produto neste conjunto é independente de outros, e todo os os outros produtos de variáveis são um produto de potências de adimensionais deste conjunto.

Sendo assim, BUCKINGHAN citado por LANGHAAR (1951) definiu o seguinte teorema denominado com seu nome: “Se uma equação é dimensionalmente

homogênea, ela pode ser reduzida em um conjunto completo de produtos de adimensionais”.

O modelo matemático genérico da função de um conjunto completo de produtos adimensionais é apresentado na equação abaixo.

$$\pi_A = F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-r}) \quad (21)$$

Onde:

π_A é o adimensional dependente que incorpora a principal variável do fenômeno
 π_n são os adimensionais invariantes independentes do fenômeno.

n é o número de variáveis envolvidas no sistema.

r é o valor da característica da matriz solução do sistema linear.

Considerando uma matriz como uma transformação $T(\)$ de um espaço ou sub-espaço linear, APOSTOL (1968), define da seguinte forma a característica de uma matriz. Dado um espaço ou sub-espaço linear finito-dimensional V , a número de dimensões deste espaço é a característica deste espaço, e respeita o seguinte teorema:

$$\dim N(T) + \dim T(V) = \dim V \quad (22)$$

Onde:

\dim é o operador algebrico simbólico para número de dimensões.

$N(T)$ é o espaço nulo.

$\dim N(T)$ é denominado nulidade.

$T(V)$ é o campo da transformação em V , (obtido através de uma operação de determinantes).

$\dim T(V)$ é a característica da transformação em V (dimensão do menor subespaço matricial diferente de zero).

Assim a nulidade mais a característica de uma transformação linear é igual a dimensão do domínio (APOSTOL, 1968).

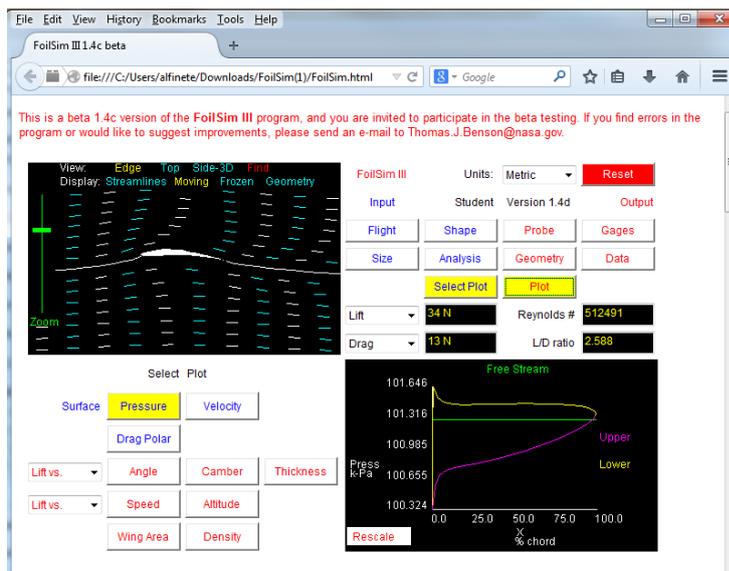
A principal vantagem da análise dimensional é a utilização de dados experimentais para a determinação do modelo, ou invés de propor um modelo e depois valida-lo (TABAK, 2002).

2.8 – Softwares de simulação de aerofólios

2.8.1 - FoilSim

O aplicativo FoilSim foi desenvolvido pela NASA Glenn Research Center e compõe-se de um software simulador interativo que determina o fluxo de ar ao redor de vários formatos de aerofólios.

Figura16 - Aplicativo FoilSim



Fonte: Aplicativo FoilSim - NASA

É composto por um painel de visualização com um simulador de túnel de vento, um painel de saída de dados e um painel de controle onde pode-se configurar parâmetros de simulação (velocidade do ar, altitude, ângulo de ataque, espessura e curvatura do aerofólio entre outras).

O software calcula as forças de sustentação e arrasto (*Lift* e *Drag*) aerodinâmicos gerando dados que podem ser utilizados no projeto de asas de aeronaves e planadores.

3 METODOLOGIA

3.1. Coleta de dados

O primeiro passo para a elaboração do trabalho foi coletar dados para caracterizar os assentamentos no que se refere a demandas energéticas. Seguido da coleta de dados dos ventos característicos das regiões onde estão instalados os assentamentos para caracterizar o perfil de ventos. Da análise destes dados, identificou-se parâmetros de entrada e saída para serem utilizados no modelo.

3.1.1 – Dados de assentamentos de agricultura familiar

Para a caracterização dos assentamentos e utilizou-se como base os dados das regiões onde estão instalados os assentamentos de agricultores familiares, conforme informações obtidas no Portal da Cidadania do governo federal. Na Tabela 01 estão relacionados os principais assentamentos e regiões de abrangência no Estado do Ceará.

Tabela 01 - Dados característicos de assentamentos de agricultores familiares no Ceará.

Macroregião	Dados Característicos
Carií – CE	<p>O Território Carií - CE abrange uma área de 15.225,60 Km² e é composto por 27 municípios: Altaneira, Antonina do Norte, Assaré, Barbalha, Farias Brito, Granjeiro, Jardim, Jati, Mauriti, Missão Velha, Nova Olinda, Penaforte, Porteiras, Potengi, Salitre, Santana do Cariri, Abaiara, Araripe, Aurora, Barro, Brejo Santo, Campos Sales, Caririaçu, Crato, Juazeiro do Norte, Milagres e Tarrafas.</p> <p>A população total do território é de 892.558 habitantes, dos quais 266.418 vivem na área rural, o que corresponde a 29,85% do total. Possui 48.208 agricultores familiares, 605 famílias assentadas e 3 comunidades quilombolas. Seu IDH médio é 0,66.</p>
Inhamuns Crateús – CE	<p>O Território Inhamuns Crateús - CE abrange uma área de 30.795,60 Km² e é composto por 20 municípios: Ararendá, Catunda, Ipueiras, Monsenhor Tabosa, Poranga, Aiuaba, Arneiroz, Crateús, Hidrolândia, Independência, Iaporanga, Ipu, Nova Russas, Novo Oriente, Parambu, Pires Ferreira, Quiterianópolis, Santa Quitéria, Tamboril e Tauá.</p> <p>A população total do território é de 524.175 habitantes, dos quais 235.562 vivem na área rural, o que corresponde a</p>

Sertão Central – CE	<p>44,94% do total. Possui 45.145 agricultores familiares, 3.649 famílias assentadas, 12 comunidades quilombolas e 1 terras indígenas. Seu IDH médio é 0,64.</p> <p>O Território Sertão Central - CE abrange uma área de 15.678,40 Km² e é composto por 12 municípios: Milhã, Banabuiú, Choró, Deputado Irapuan Pinheiro, Ibaretama, Mombaça, Pedra Branca, Piquet Carneiro, Quixadá, Quixeramobim, Senador Pompeu e Solonópole.</p>
Sertões de Canindé – CE	<p>A população total do território é de 362.091 habitantes, dos quais 158.415 vivem na área rural, o que corresponde a 43,75% do total. Possui 28.808 agricultores familiares, 2.096 famílias assentadas e 1 comunidade quilombola. Seu IDH médio é 0,63.</p> <p>O Território Sertões De Canindé - CE abrange uma área de 9.099,20 Km² e é composto por 6 municípios: Boa Viagem, Canindé, Caridade, Itatira, Madalena e Paramoti.</p>
Sobral – CE	<p>A população total do território é de 195.314 habitantes, dos quais 86.314 vivem na área rural, o que corresponde a 44,19% do total. Possui 17.416 agricultores familiares, 3.261 famílias assentadas. Seu IDH médio é 0,62.</p> <p>O Território Sobral - CE abrange uma área de 8.396,70 Km² e é composto por 17 municípios: Alcântaras, Frecheirinha, Graça, Groaíras, Meruoca, Mucambo, Pacujá, Reriutaba, Santana do Acaraú, Cariré, Coreaú, Forquilha, Massapê, Moraújo, Senador Sá, Sobral e Varjota.</p> <p>A população total do território é de 450.391 habitantes, dos quais 128.767 vivem na área rural, o que corresponde a 28,59% do total. Possui 21.484 agricultores familiares, 1.000 famílias assentadas e 1 comunidade quilombola. Seu IDH médio é 0,65.</p>

Fonte: Sistema de Informações Territoriais (<http://sit.mda.gov.br>).

3.1.2 – Dados de perfil de ventos

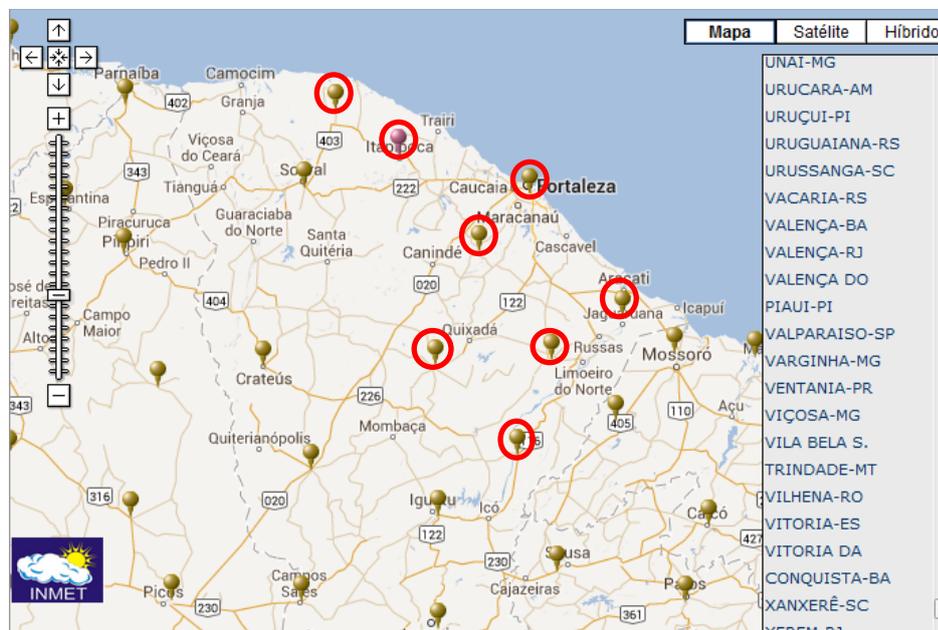
A partir da análise de dados passa-se para análise do perfil de ventos das regiões onde estes estão instalados.

Os dados de ventos foram obtidos a partir de estações de coleta de dados do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, entre os dias 20/05/2014 e 17/07/2014. A distribuição das estações é apresentada na Figura 10.

Foram analisados dados de estações localizadas nos municípios onde estão os assentamentos ou na macroregião, quando da não existência de estação no referido município.

A listagem das estações selecionadas e demais dados de georeferenciamento destas estações estão apresentados na Tabela 02.

Figura 17 – Distribuição das estações coletoras de dados no Ceará



Fonte: Adaptado do INMET

Tabela 02 - : Estações de coleta de dados no Ceará.

Estação	Localização	Data de Abertura	Latitude	Longitude	Altitude (m)
A360	ACARAU	22/04/2009	-3.12083°	-40.0869°	76.00
A314	GUARAMIRANGA	26/05/2007	-4.2611°	-38.9309°	870.00
A305	FORTALEZA	18/02/2003	-3.80000°	-38.5333°	41
A359	ITAPIPOCA	05/09/2008	-3.48389°	-39.5883°	102.00
A358	JAGUARIBE	11/09/2008	-5.90528°	-38.6278°	184.00
A339	JAGUARUANA	10/11/2007	-4.78694°	-37.7769°	12.00
A332	MORADA NOVA	23/08/2007	-5.1364°	-38.3564°	44
A325	QUIXERAMOBIM	09/07/2007	-5.1742°	-39.2872°	218.00

Fonte: INMET

Como resultado da análise tem-se a distribuição do perfil de ventos em cada uma das regiões estudadas.

Na Tabela 03 estão relacionados os dados de velocidade média máxima e mínima de cada região, assim como os parâmetros de distribuição.

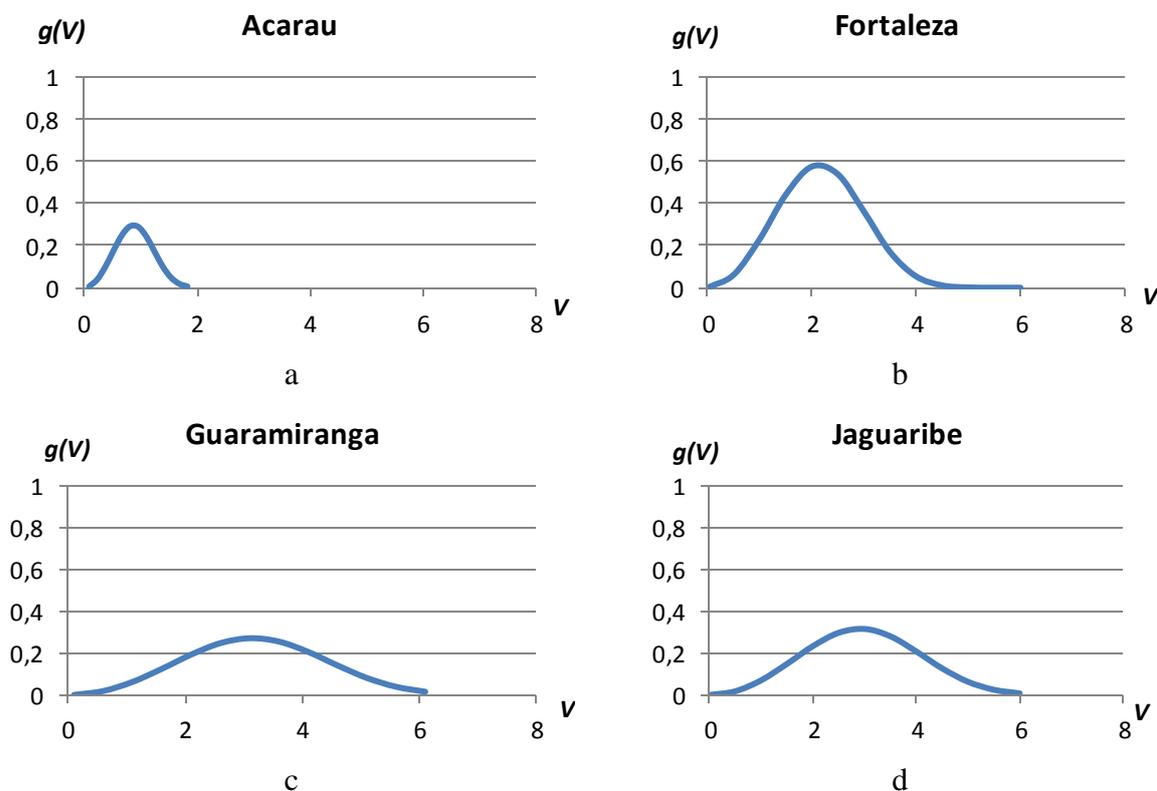
TABELA 03: Características do vento e distribuição por localidade .

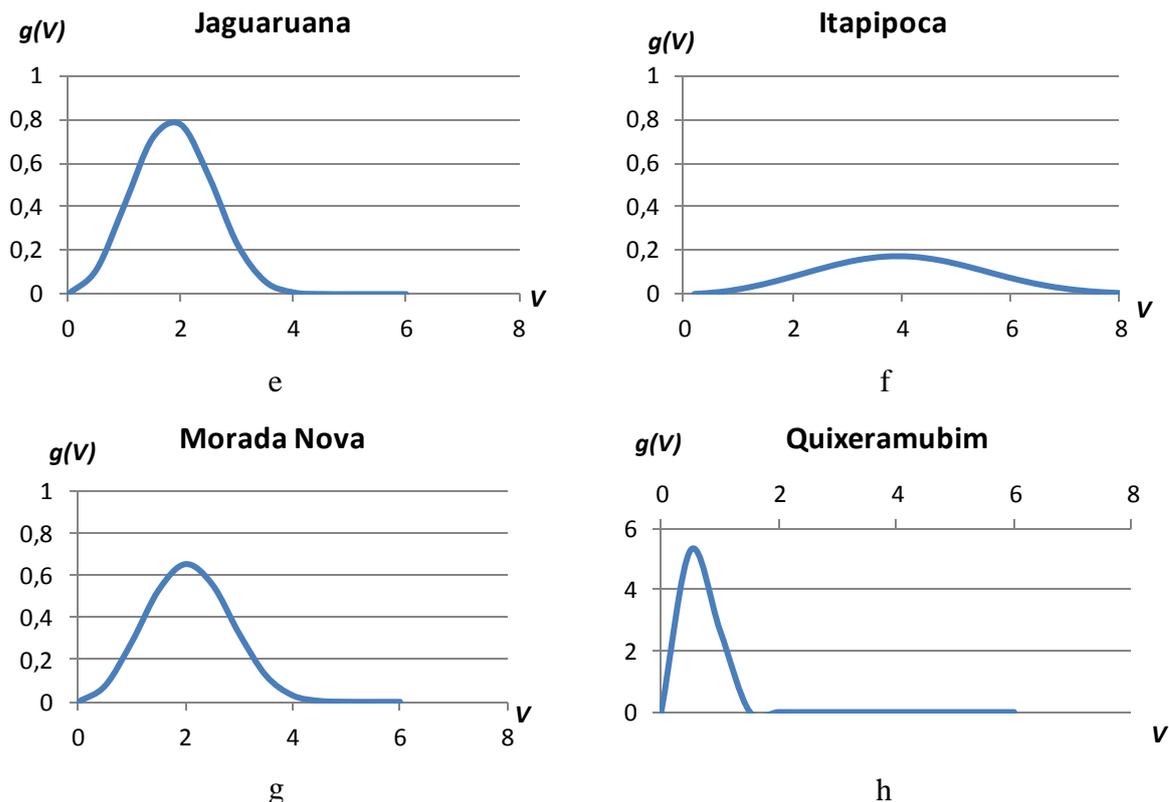
Estação	Dados de vento (m/s)			Fatores de Distribuição	
	Média	Máx:	Mín:	k	c
ACARAU (CE)	3,059402	7,6	0,3	3	3,452166
FORTALEZA (CE)	2,180834	6,2	0	3	2,460808
GUARAMIRANGA (CE)	3,108368	7,1	0,2	3	3,507417
ITAPIOCA (CE)	3,509207	8,8	0,3	3	3,959716
JAGUARIBE (CE)	2,500368	8,7	0,1	3	2,821363
JAGUARUANA (CE)	2,16092	7,5	0	3	2,438337
MORADA NOVA (CE)	1,604364	6,3	0	3	1,810331

Fonte: adaptado de INMET

Para a caracterização do regime de ventos foi utilizada a distribuição estatística de Weibull, que permite boa apresentação da confiabilidade do vento apresentadas na Figura 18.

Figura 18 : Distribuição de Weibull para os dados de ventos





Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo Albiero (2012), a Carga elétrica estimada a ser fornecida para uma família produtora do assentamento se refere a um motobomba de irrigação Schneider de $\frac{1}{2}$ cv, 368 W ; computador: 180 W; geladeira: 130 W; televisão: 110 W. Total : 970 W.

Para efeito de cálculo, estabeleceu-se a potência de 1kW.

3.2 Dimensionamento de rotores

O projeto de rotor eólico tem como base fundamental o dimensionamento de seus elementos constituintes onde o principal elemento é a pá eólica. Este elemento é composto por um perfil aerodinâmico, escolhido de modo a aproveitar com máxima eficiência a energia cinética dos ventos e convertê-la em torque para o gerador elétrico. Seu projeto compreende a definição do diâmetro do rotor, a geometria do perfil aerodinâmico, os parâmetros aerodinâmicos (tais como ângulo de passo, velocidades), a geometria do perfil longitudinal da pá (corda e *torção*).

Segundo Manwell (2009), a potência gerada está relacionada com o diâmetro do rotor e a velocidade dos vetos.

$$P_{ret} = \rho \left(\frac{A * V_1^2}{4} \right) \left(1 + \frac{V_3}{V_2} \right) \left(1 + \left(\frac{V_3}{V_2} \right)^2 \right) \quad (19)$$

em que,

P_{ret} – Potência Retirada

ρ – Densidade do ar em kg/m³.

A – Área do rotor

V_1, V_2, V_3 – Velocidades anterior, adjacente e posterior ao plano do rotor.

A determinação do perfil aerodinâmico é efetuada com base em dados do perfil obtidos em ensaios de túnel de vento, onde os mais relevantes são a sustentação (*Lift*) e o arrasto (*Drag*). Em rotores de pequeno porte, a relação entre a sustentação e o arrasto é necessária para o controle da velocidade resultante entre a velocidade dos ventos e a velocidade angular. Um parâmetro que define esta relação é o parâmetro λ . Este parâmetro é um número adimensional dado pela relação entre a velocidade de rotação na ponta da pá, V_u , em m/s, e a velocidade v do vento, em m/s.

$$\lambda = V_u / v \quad (20)$$

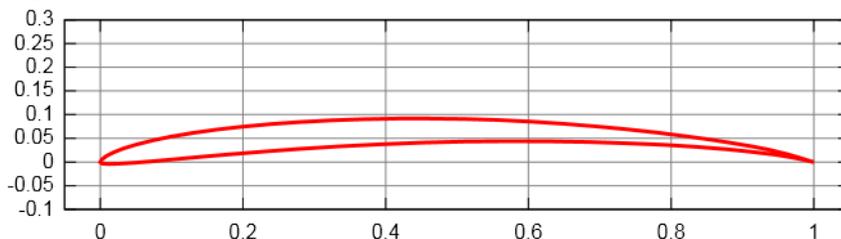
A velocidade de rotação da pá V_u pode ser definida pelo produto da velocidade angular Ω da pá, em rad/s, e o raio R desta, em metros.

$$V_u = \Omega R \quad (21)$$

Com a necessidade de um alto valor de relação Cl/Cd , baixo número de Re , os perfis aerodinâmicos que possuem esta característica são os perfis de alto desempenho utilizados em planadores como por exemplo os da série Eppler.

O perfil adotado para este projeto foi o E61 (Eppler E61) que apresenta excelentes condições de uso em baixas velocidades de vento. Sua utilização em aeronáutica se dá em planadores, e suas características foram obtidas por meio da Airfoil Investigation Database. (2011) na Figura 19 e Tabela 04

Figura 19 - Perfil E61



Fonte: AIRFOIL INVESTIGATION DATABASE., 2011

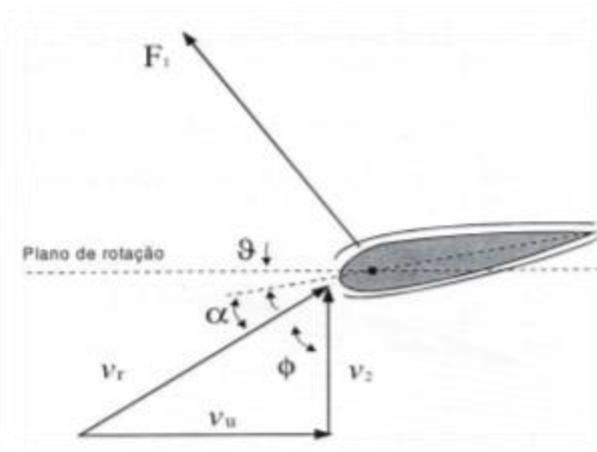
Tabela 04 – Dados do perfil E61.

Espessura	5.7%
Camber:	6.7%
C_L Maximo:	1.598
Ângulo Max C_L (°):	5.0
Max L/D:	80.133
Ângulo Max L/D (°):	3.5
Ângulo Max L/D C_L :	1.426
Ângulo de Stall(°):	5.0
Ângulo de sustentação zero(°):	-9.0

Fonte: AIRFOIL INVESTIGATION DATABASE., 2011

Com o perfil definido é possível determinar para qual ângulo de ataque o perfil terá maior relação sustentação-arrasto (C_l/C_d). O ângulo de ataque na Figura 20 descreve a relação entre velocidades, ângulos e planos de rotação da pá. Pela figura temos o ângulo de ataque α , as velocidades V_2 , V_r e V_u (velocidade do vento e suas componentes), os ângulos de pitch e torção (ϕ e β) e a força de sustentação F .

Figura 20. Relação entre velocidades, ângulos e plano de rotação da pá



Fonte: SANTOS (2006)

A geometria longitudinal da pá é definida com base em diversos parâmetros (diâmetro do rotor, o número de pás, o coeficiente de sustentação e a velocidade específica λ) que são utilizados para a definição da corda da pá em função de seu raio local (distância relativa do eixo do rotor). A equação 23 define a corda local, em metros, para cada seção r da pá.

$$C(r) = \frac{8}{9} \left(\frac{2 * \pi * R}{n} \right) \left(\frac{1}{Cl \lambda^2 \left(\frac{r}{R} \right)} \right) \quad (23)$$

em que,

$C(r)$ – Corda Local

Ao longo da geometria longitudinal, para melhoria da eficiência da pá, o perfil sofre torção (twist) que é calculado conforme apresentado nas equações 24 e 25 descritas abaixo

$$\beta(r) = \gamma(r) + \alpha(r) \quad (24)$$

$$\gamma(r) = \arctan((3/2)(r/R)\lambda D) \quad (25)$$

onde β é o ângulo de torção, γ representa o ângulo entre a velocidade resultante do vento (soma geométrica entre a velocidade do vento e a velocidade de rotação da pá) e a velocidade de rotação da pá, e α é o ângulo de ataque.

3.2.1 – Ferramenta de modelagem

O modelo computacional foi elaborado e implementado em software codificado na linguagem C++ e permite efetuar simulação do dimensionamento com base nas equações vistas anteriormente e em parâmetros de entrada.

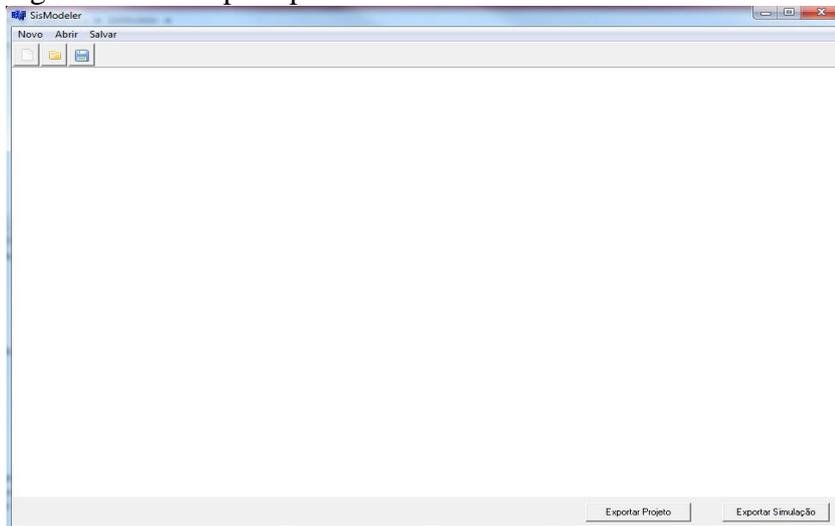
O resultado do modelo constitui-se de parâmetros geométricos que devem ser adequados ao projeto de turbina e local de instalação para obter o melhor rendimento.

A definição dos parâmetros geométricos (variação dimensional da corda e ângulos de torção ao longo da extensão radial da pá) é realizada a partir do coeficiente de

sustentação (obtido através da análise dos dados do perfil aerodinâmico), do raio do rotor do número de pás e da velocidade específica da ponta da pá (TSR).

A Figura 21 apresenta a tela principal do software.

Figura 21 - Tela principal do software

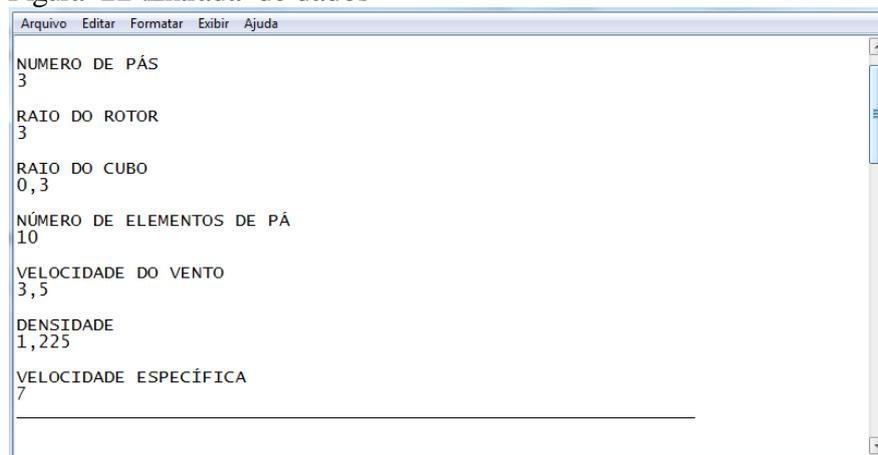


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os parâmetros geométricos podem ser calculados de duas formas diferentes: com base no raio do rotor ou com base na potência requerida.

A entrada de dados é realizada pela inserção de valores nos campos de entrada de dados apresentados na Figura 22.

Figura 22 :Entrada de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para estimar o raio rotor R , utilizou-se a equação deduzida da equação de :

$$R = \sqrt{\frac{2P}{\pi\rho V^3 C_p \eta}} \quad (26)$$

Onde:

P – Potência

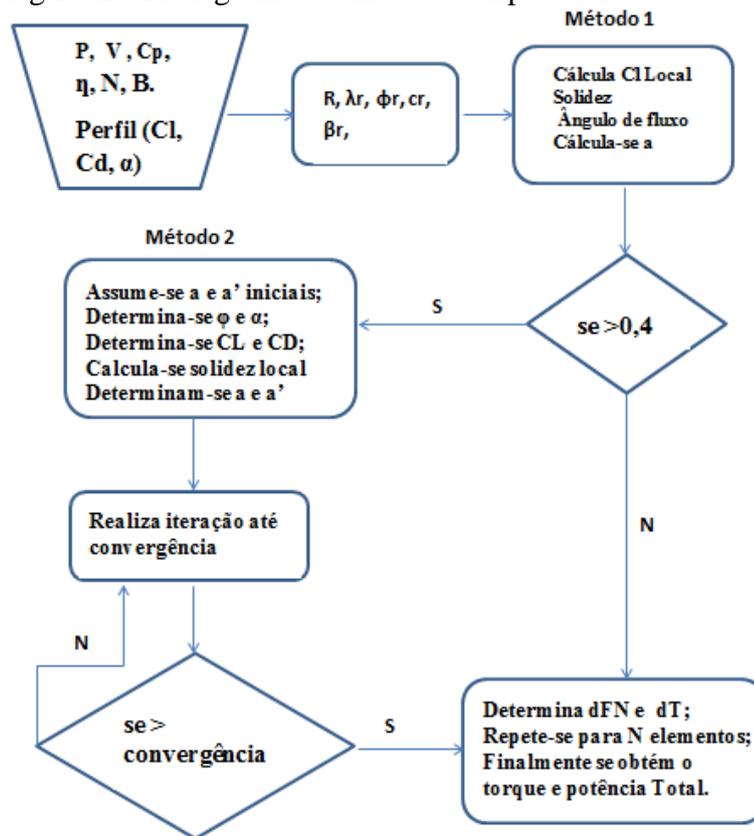
η - Rendimento global(perdas do sistema)

P- Densidade do ar.

Os fatores de indução axial e radial devido ao vento resultante (velocidade relativa do vento ao longo do perfil) utilizados na definição da torção, são obtidos por procedimento iterativo aplicado aos elementos de pá. A descrição do procedimento encontra-se no algoritmo apresentado no Apendice A.

O fluxograma de modelo é apresentado na Figura 23.

Figura 23 :Fluxograma do modelo computacional.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.2 – *Elaboração parâmetros de verificação de protótipo em análise dimensional*

Como ferramenta para verificação de cargas em perfis aerodinâmicos, asas e aeronaves e pás de aerogeradores, são empregados ensaios com modelos em escala reduzida. Avaliam-se a influência de parâmetros e condições de operação reproduzindo situações reais e relacionando informações confiáveis condições de operação.

Utilizando metodologia de análise dimensional pode-se determinar adimensionais (Pi-termos) para estudar efeito de fluxos na aerodinâmica de perfis.

Segundo LANGHAAR (1951), a análise dimensional trata das formas gerais das equações que descrevem os fenômenos naturais. MACIEL (1993) expões que inúmeros pesquisadores utilizam da análise dimensional para estudar implementos de preparo do solo, isso se deve não somente ao fato de ser envolvido um número bastante elevado de variáveis, mas também pela possibilidade de se trabalhar em laboratório utilizando modelos em escala reduzida, empregando-se a teoria da similitude (ALBIERO, 2006).

O processo de modelagem consiste na listagem dos N parâmetros envolvidos seguidos da expressão dos parâmetros em termos das dimensões primárias (r) (ALBIERO, 2010). A Tabela 05 mostra os valores para grandezas primárias analisadas no estudo de cargas em perfis aerodinâmicos.

TABELA 05. Dimensõe primarias para análise dimensional.

Descrição	Dimensões primárias	Parâmetros
corda	L	k1
espessura	L	k2
densidade	M.L ⁻³	k3
pressão	M.L ⁻¹ .T ⁻²	k4
temperatura	K	k5
frequência	T ⁻¹	k6
velocidade	L.T ⁻¹	k7

Fonte; Elaborado pelo autor

Segundo ALBIERO (2010), dado um problema físico no qual um parâmetro de interesse é uma função de n-1 parâmetros independentes, é possível escrever a relação:

$$A = \pi r^2 q_1 = f(q_2, q_3, q_4, \dots, q_n) \quad (27)$$

$$g(q_2, q_3, q_4, \dots, q_n) = 0 \quad (28)$$

O Teorema dos Pi de Buckingham declara que dada uma relação entre n parâmetros, os n parâmetros podem ser agrupados em $n-m$ razões independentes adimensionais (parâmetros Π), expressos como segue:

$$G(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{n-m}) = 0 \quad (29)$$

$$\Pi_1 = G_1(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-m}) \quad (30)$$

A definição de grupos adimensionais segue etapas de operação descrita a seguir:

- PASSO 1: Listagem dos parâmetros envolvidos(n).
- PASSO 2: Expressão dos parâmetros em termos das dimensões primárias – r (Tabela 06).
- PASSO 3: Selecione da lista um número r de parâmetros.
- PASSO 4: Estabeleça equações dimensionais combinando os parâmetros selecionados para formar grupos adimensionais. ($n-r$), a não ser que $r \neq m$. Neste caso ($n-m$).
- PASSO 5: Resolução das equações para obtenção de grupos adimensionais(Tabela 07).
- PASSO 6: Verifique se o grupo obtido é adimensional.
- PASSO 7: Validação do Pi-termo.

Tabela 06 - Matriz de equações dimensionais combinando parâmetros para formação de grupos adimensionais.

	k1	k2	k3	k4	k5	k6
M	1	1	0	0	0	0
L	-3	-1	0	0	0	1
T	0	0	-1	0	-1	-1

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os resultados obtidos pela aplicação da análise dimensional na determinação DOS π -termos que relacionem os esforços em perfis para análise levou a dedução dos π -termos apresentados na tabela 3. As tabelas 1 e 2 apresentam a composição dos parâmetros pelo teorema de Buckingham.

Tabela 07 - Matriz de resolução das equações para obtenção de grupos adimensionais.

$\Pi_1 = (C.W)/V$	Relativo a variabilidade no sentido do fluxo
$\Pi_2 = (E.W)/V$	Relativo a variabilidade no sentido perpendicular ao fluxo.
$\Pi_3 = (u.W)/P$	Relativo a pressão de extradorso no perfil.

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS

4.1 – Apresentação dos resultados

Com uso do software, os dados referentes a potência requerida e demais características do projeto listados na Tabelas 08, dados do perfil aerodinâmico conforme Tabela 04, dados de rendimento do gerador e a caracterização de ventos nos locais de instalação e aplicando os conceitos vistos foram obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 09 a 12 para 4 diferentes condições de vento (agrupados pela distribuição característica das regiões). Nosso projeto tem por base a potência requerida.

Com os dados de entrada apresentados listados na Tabela 04. A potência requerida foi estimada para uma aplicação de bombeamento de água para irrigação. Os dados de velocidade dos ventos foram obtidas das estações de coleta de dados do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, o número de pás é arbitrado com base no fator λ .

TABELA 08. Parâmetros de entrada utilizados na modelagem .

PARÂMETROS	
Potência requerida	1000 W
Número de pás	3
Rendimento do gerador	0,9
Número de elementos de pá	10

TABELA 09.Valores calculados pelo modelo computacional:
(V1=1 m/s.)

Elemento de pá	Raio (m)	Corda (m)	Ângulo de Torção (°)	Velocidade Relativa(m/s)
1	3,80	4,51	31,92	1,16
2	7,60	3,84	18,94	1,68
3	11,40	2,98	12,23	2,30
4	15,20	2,37	8,35	2,95
5	19,00	1,96	5,88	3,62
6	22,80	1,66	4,18	4,30
7	26,60	1,43	2,94	4,99
8	30,40	1,26	2,00	5,68
9	34,20	1,13	1,26	6,37
10	37,99	1,02	0,67	7,06

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela- 10.Valores calculados pelo modelo computacional: a- V2=2 m/s.)

Elemento de pá	Raio (m)	Corda (m)	Ângulo de Torção (°)	Velocidade Relativa(m/s)
1	1,34	1,60	31,92	2,32
2	2,69	1,36	18,94	3,37
3	4,03	1,05	12,23	4,60
4	5,37	0,84	8,35	5,91
5	6,72	0,69	5,88	7,25
6	8,06	0,59	4,18	8,61
7	9,40	0,51	2,94	9,98
8	10,75	0,45	2,00	11,36
9	12,09	0,40	1,26	12,74
10	13,43	0,36	0,67	14,13

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela - 11.Valores calculados pelo modelo computacional: a- V3=3 m/s.)

Elemento de pá	Raio (m)	Corda (m)	Ângulo de Torção (°)	Velocidade Relativa(m/s)
1	0,73	0,87	31,92	3,48
2	1,46	0,74	18,94	5,05
3	2,19	0,57	12,23	6,90
4	2,92	0,46	8,35	8,86
5	3,66	0,38	5,88	10,87
6	4,39	0,32	4,18	12,91
7	5,12	0,28	2,94	14,97
8	5,85	0,24	2,00	17,04
9	6,58	0,22	1,26	19,11
10	7,31	0,20	0,67	21,19

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 12 - Valores calculados pelo modelo computacional: a- V4=4 m/s.)

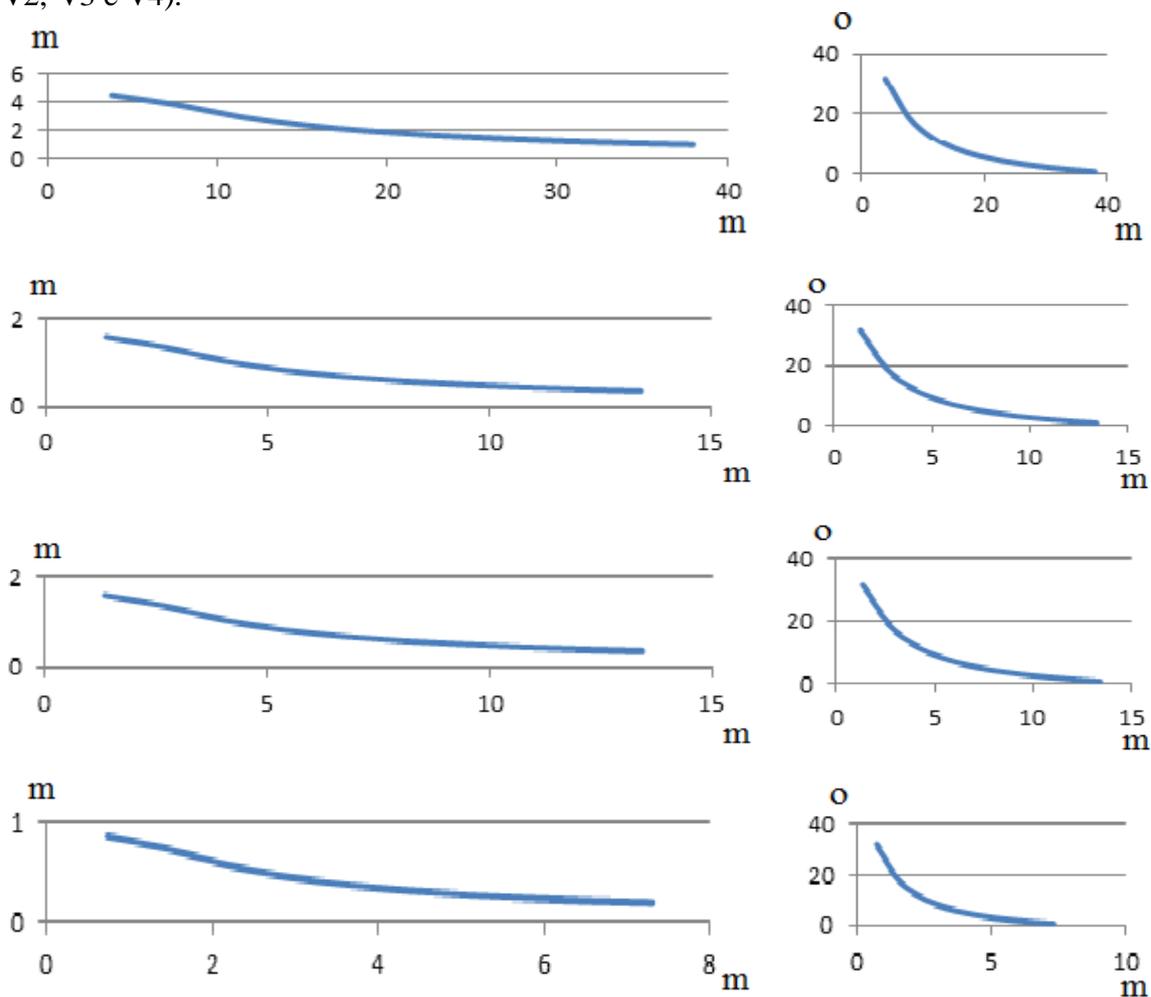
Elemento de pá	Raio (m)	Corda (m)	Ângulo de Torção (°)	Velocidade Relativa(m/s)
1	0,47	0,56	31,92	4,63
2	0,95	0,48	18,94	6,74
3	1,42	0,37	12,23	9,20
4	1,90	0,30	8,35	11,82
5	2,37	0,24	5,88	14,50
6	2,85	0,21	4,18	17,22

7	3,32	0,18	2,94	19,96
8	3,80	0,16	2,00	22,71
9	4,27	0,14	1,26	25,48
10	4,75	0,13	0,67	28,25

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os dados calculados, obteve-se os seguintes dados de geometria de pás conforme a Figura 23, onde é apresentado o afilamento e a torção para cada uma das velocidade estudadas.

Figura 24. Geometria da pá (a - corda estimada(m) e b – torção(°)) para velocidades V1, V2, V3 e V4).



Fonte: Elaborado pelo autor

Com os dados obtidos do modelo, aplicamos os valores de velocidade relativa, seção da pá, corda e parâmetros do perfil E61 no aplicativo FoilSim e foram obtidos os resultados de sustentação e arrasto apresentados na Tabela 13.

Tabela: 13 – Dados obtidos com uso do aplicativo FoilSim para velocidades V1, V2 V3 e V4.

Elem .de Pá	Razão (r/R)	V1		V2		V3		V4	
		L	D	L	D	L	D	L	D
1	0,1	11,000	4,789	5,674	2,344	3,791	1,571	3,328	1,382
2	0,2	24,000	9,800	11,000	4,929	8,000	3,300	7,029	2,904
3	0,3	38,000	13,000	22,000	9,161	12,000	4,374	9,273	3,268
4	0,4	52,000	15,000	26,000	7,821	17,000	5,280	13,000	3,975
5	0,5	68,000	17,000	33,000	8,757	22,000	5,966	16,000	4,339
6	0,6	84,000	19,000	41,000	9,701	27,000	6,460	20,000	4,917
7	0,7	99,000	20,000	49,000	10,000	33,000	7,045	24,000	5,196
8	0,8	115,000	21,000	57,000	11,000	37,000	7,158	28,000	5,589
9	0,9	132,000	22,000	65,000	11,000	43,000	7,838	32,000	5,693
10	1	148,000	23,000	73,000	11,000	49,000	8,276	36,000	6,216

Fonte: Elaborado pelo autor . Legenda: L sustentação (*Lift*), D – Arrasto (*Drag*)

Tabela 14 - Valores de sustentação: a – Pelo modelo, b – oriundos do FoilSim. (valores em Newton)

Velocidade	V1		V2		V3		V4	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Sustentação	919,5	771	382,67	459,75	306,5	251,79	229,88	188,63
% de erro	16,15		16,15		17,85		16,15	

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 15 - Valores de Torque calculados: a – Pelo modelo, b – Por cálculo com valores oriundos do FoilSim.

Velocidade	V1		V2		V3		V4	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Torque	8999,3	10670,26	1704,05	2024,16	618,38	824,2	301,24	405,22
% de erro	10,69		18,8		33,28		34,52	

Fonte: Elaborado pelo autor

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 – Validação dos resultados

Para a verificação dos resultados, os valores obtidos com o modelo serão comparados com os resultados de aplicativos de simulação de aerofólios.

Os programas descritos anteriormente são utilizados no estudo de aerodinâmica de perfis aplicados a aviões. Possuem limitações que não permitem uma análise da pá por completo, visto não permitirem o afilamento e torção do perfil inteiro.

Dentre os aplicativos estudados será utilizado o aplicativo FoilSim devido ao mesmo permitir de forma mais rápida a obtenção das forças atuantes em seções de perfil, onde pode-se inferir sobre as forças aplicadas em cada seção e verificar a viabilidade em função do torque gerado na pá.

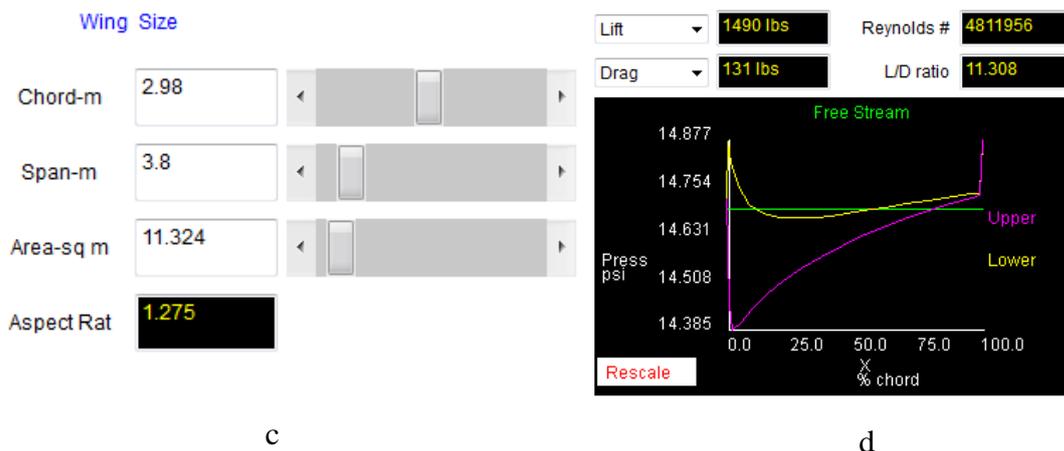
Sua facilidade de uso também colaborou com a escolha visto que apenas configurando-se os parâmetros do perfil (espessura, *camber* ou *curvatura* e os dados de corda) Para esta análise, utilizaremos o valor da velocidade relativa (W) que é a velocidade no sentido da corda, resultante da interação da velocidade do vento com o perfil aerodinâmico automaticamente se obtém os valores das forças de Sustentação e Arrasto.

Figura 24 – Aplicativo FoilSim: a – Painel principal, b-Configuração do perfil, c-Configuração da asa, d – Forças atuantes no perfil.



a

b



Fonte: FoilSim - NASA

Com a utilização do modelo foram obtidos valores de raio, corda, ângulos de torção e velocidade relativa do vento, apresentados nas tabelas 09 a 12

Para verificação destes resultados devemos analisar a capacidade de torque gerado pelo rotor.

O modelo desenvolvido calculou valores de sustentação e torque com base nos resultados obtidos que foram apresentados nas Tabelas 14 e 15

Com a utilização do aplicativo FoilSim, simulamos os dados de perfil gerados nas condições de operação para as velocidades de vento estudadas. Obtivemos os valores de sustentação simulados (Tabela 13) e com estes, calculamos o torque com base nas equações 14 a 18. Os resultados de sustentação e torque calculados no modelo e os obtidos com valores simulados foram comparados e se efetuou o cálculo do erro percentual através da equação :

$$Erro\% = \left[\frac{(V_m - V_s)}{V_m} \right] * 100 \quad (30)$$

Onde : V_m representa o valor calculado no modelo

V_s representa o valor calculado com dados simulados

Os erros percentuais nos valores de sustentação, apresentam variação entre 16,15 e 17,85% e os valores de torque apresentam variação da ordem de de 10,69 a 34,52%.

Como podemos observar, a variação da sustentação oscila entre média de 16,66%. Já os valores de torque oscilam entre a média 32,07% com variação máxima de 25,44%.

Analisando estes valores, acreditamos que a sustentação apresenta esta variação devido as características da simulação do FoilSim que não permite a inserção de uma seção de pá menor que o valor de corda e pelo efeito torcional da pá (ao se adotar uma maior quantidade de seções (N), não seria possível obter valores simulados pelo FoilSim).

Observar-se que com baixa velocidade de vento, mesmo com a utilização de perfil de alto desempenho, pode-se ter dificuldade de obtenção de potência

Com os resultados obtidos pelo modelo temos que :

Para localidades com perfil de ventos V1(1m/s) e V2(2m/s), pode não ser viável a aplicação destas pás em agricultura familiar, devido as grandes dimensões necessárias para obtenção da potência requerida(pás com 38 e 15 m de extensão) .

Para localidades com perfil de ventos V3(3m/s) e V4(4m/s), pode ser aplicavel, em agricultura familiar, devido as dimensões necessárias para obtenção da potência requerida(pás com cerca de 7 e 5 m de extensão) .

Para uma validação efetiva do modelo, é conveniente efetuar a construção da rotor e avaliar seus resultados em campo.

Como isto demanda aporte financeiro de grande porte, a fabricação destes equipamentos para efetiva avaliação de desempenho, poderia não ser possível.

Com estas condições, sugerimos a utilização da metodologia de análise dimensional, afim de apresentar de forma economicamente viável, uma alternativa a confecção de um protótipo para ensaios.

Para este fim, elaboramos um conjunto de adimensionais π -termos, que possam representar grandezas relacionadas aos fenômenos físicos que ocorreriam em uma instalação de equipamento real.

Também propomos a confecção de um aparato experimental para ensaios do protótipo descritos na seção a seguir.

6 CONCLUSÕES

Com a realização destes estudos foi possível elaborar e codificar um modelo matemático que permite estabelecer valores geométricos para a fabricação de pás com perfil de alto desempenho (E61) a partir de parâmetros de projeto.

A validação do modelo apresentou dificuldades devido a ferramenta utilizada não ser específica para aerogeradores visto que a análise dos parâmetros gerados pelo modelo através de simulação, requer características específicas como a ocorrência de torção da pá que promove mudança de fluxo ao longo da estenção longitudinal da mesma.

Devido a este fato, foram elaborados parâmetros de verificação para protótipo em escala (adimensionais π -termos) utilizando a metodologia de análise dimensional e propusemos a *set-up* de uma ferramenta de ensaio (túnel de vento), pra verificação deste parâmetros.

7 REFERÊNCIAS

- ALBIERO, Daniel. **Desenvolvimento e avaliação de máquina multifuncional conservacionista para a agricultura familiar.** - Campinas, SP: [s.n.], 2010.
- ALBIERO, Daniel. **Avaliação do preparo de solo empregando o sistema de cultivo conservacionista em faixas com “Paraplow” rotativo usando análise** -- Campinas, SP: [s.n.], 2006.
- ALBIERO, Daniel. **Turbina eólica para agricultura familiar do semiárido com inovações tecnológicas para baixas velocidades de vento.**-- Fortaleza, CE, 2012.
- Atlas do Potencial Eólico Brasileiro: CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. <http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php > Acesso em 21 de junho de 2012.
- Balanço Energético Nacional 2011: Ano base 2010 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2011.
- Balanço Energético Nacional 2012: Ano base 2011 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2012.
- Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2013.
- BLEY, Cícero – **A estiagem, o clima e a energia**
<<http://www.diadecampo.com.br/zpublisher/materias/Materia.asp?id=30086&secao=Colunas%20e%20Artigos&c2=Biog%E1s> > Acesso em 16 de junho de 2014.
- BURTON, T., Sharpe, D., Jenkins, N., Bossanyi, E. **Wind energy: handbook.** Ed. John Wiley & sons, Inglaterra, 2001.
- Ceará vai receber 48 novos parques eólicos nos próximos quatro anos.**
<<http://g1.globo.com/ceara/noticia/2012/02/ceara-vai-receber-48-novos-parques-eolicos-nos-proximos-quatro-anos.html>>. Acesso em Ago 2013.
- CEPEL, 2001. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro.** Ed. CEPEL, Rio de Janeiro, RJ. Comparação de requisitos, vantagens, desvantagens e condicionantes entre geração eólica e solar. <<http://www.aerogeradores.org/eolicavssolar.php>>. Acesso em: Ago 2013.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito / CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.
- Dados de assentamentos de agricultores familiares no Ceará (regiões: Sertão Central, Itapipoca, Cariri, Inhamuns Crateús, Sobral, sertão de Caninde, Vales do Curu e Aracatiáçu.**
<<http://www.territoriosdacidadania.gov.br/dotlrn/clubs/territoriosrurais>>. Acesso em Ago 2013.

- DUTRA, R.(org.). **Energia eólica: princípios e tecnologias**. CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
- GASCH, R., TWELE, J. **Wind power plants**. Ed. Solarpraxis AG, Germania, 2002.
PERFIS - AEROFÓLIOS PARA AERONAVES LEVES - Eduardo Hilton.
 <<http://www.aviacaoexperimental.pro.br/aero/perfis/perfisa/vilevel.html> >. Acesso em Jun 2014
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, 2012.
- LANGHAAR, H. L.. **Dimensional analysis and theory of models**. 1a Ed. New York: Jonh Wiley and Sons, 1951
- MACIEL, A. J. S.; GAMERO, C. A. **Enxada rotativa: análise dimensional, requerimento energético e efeitos no solo utilizando diferentes geometrias de lâminas**. 143 p. Tese de doutorado – Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu da Universidade Estadual Paulista, Botucatu. 1993.
- Montezano, B. E. M.; **Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML**, Escola Politécnica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G. **WIND NERGY EXPLAINED, Theory, Design and Application**. Ed. Wiley, 2Ed, 2009.
- Nakamura, E. T. José Jorge Marinho Aucar Júnior** Zanolli, J. R., Machado, W. V. **Utilização de ferramentas CAD/CAE/CAM no desenvolvimento de produtos eletroeletrônicos: vantagens e desafios**. T&C Amazônia, Ano 1, nº 2, Jun de 2003.
- PAVINATTO, Eduardo Fiorine. Ferramenta para auxílio de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica, 2005
- RODRIGUES, DIEGO F. **Os sistemas CAE e seu uso no processo de desenvolvimento de produtos**, 2011.
- SANTANA, M. N. **Estudo e avaliação da operação de um sistema de geração eólica**, UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA, 2009
- WENZEL, G. M. **PROJETO AERODINÂMICO DE PÁS DE TURBINAS EÓLICAS DE EIXO HORIZONTAL**, Porto Alegre, RS, 2007.
- PIRES, J. C. P. **Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual**, Porto Alegre, RS ,2010.
- MELO, G. M. **Um estudo da viabilidade de pequenos aerogeradores na produção de energia elétrica**. Recife, dezembro de 2009.
- SILVA, Amanda B. **Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas**. Rio de Janeiro-RJ, 2013

SODRÉ, U. **Modelos matemáticos**. Londrina-PR, 27 de Junho de 2007.