UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MONIQUE REGINA FONSECA

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE PITCH NO DESEMPENHO DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE PROJETADO COM O PERFIL AERODINÂMICO NREL S809

FORTALEZA
2012

MONIQUE REGINA FONSECA

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE PITCH NO DESEMPENHO DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE PROJETADO COM O PERFIL AERODINÂMICO NREL S809

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. Área de concentração: Processos Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

FORTALEZA

2012

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

F742i Fonseca, Monique Regina.
Influência do ângulo de Pitch no desempenho de um aerogerador de pequeno porte projetado com o perfil aerodinâmico NREL S809 / Monique Regina Fonseca – 2012.
85 f. : il., enc. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2012.
Área de Concentração: Processos Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Energia eólica 2.Aerodinâmica. I. Título.

CDD 658.51

MONIQUE REGINA FONSECA

INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE PITCH NO DESEMPENHO DE UM AEROGERADOR DE PEQUENO PORTE PROJETADO COM O PERFIL AERODINÂMICO NRL S809

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. Área de concentração: Processos Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovado em: 26/09/2012

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Francisco Ilson da Silva Jr.

Universidade Federal do Ceará – UFC

Prof. Dr. Daniel Albiero

Universidade Federal do Ceará – UFC

Ao meu marido Igor, pelo seu constante e incondicional apoio.

AGRADECIMENTOS

Ao meu marido Igor dos Santos, quem esteve ao meu lado me apoiando e me dando motivação.

A meus familiares e amigos, que mesmo distante estiveram sempre presentes comigo, me deram confiança e apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pelos ensinamentos, pela orientação, pelo apoio, e pela paciência.

Ao Prof. Dr. Daniel Albiero, que me ajudou com os estudos estatísticos.

Aos professores da UFC, que me deram a oportunidade de ingressar neste curso.

Aos meus colegas do mestrado, que foram companheiros ao longo dos meses.

Aos meus colegas do Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos, em particular aos colegas: Alberto Lopes, Francisco Olimpio, Danilo Azevedo, Ângelo Modolo, Welbson de Araújo e Lucas Peixoto pela ajuda em vários momentos. E a todos os demais colegas cujo nomes não foram citados.

Ao Programa CAPES-REUNI, pela concessão da bolsa.

Aos funcionários da UFC Valdi e Juliana pelo suporte dado durante o curso.

RESUMO

O controle do ângulo pitch é uma técnica amplamente usada para controlar a resposta aerodinâmica de um aerogerador de eixo horizontal (HAWT). Embora o controle do pitch seja encontrado quase que exclusivamente em grandes HAWTs, sua utilização para as pequenas não pode ser desconsiderada, apesar do fato de que os meios eletrônicos para essa função tendem a aumentar o custo do aerogerador**.** Este tipo de controle é de grande importância para evitar problemas estruturais ao aerogerador, causado pelas altas velocidades do vento, ou para configurar a taxa de velocidade de ponta da turbina para seu valor de projeto. Este trabalho tem o objetivo de promover um estudo comparativo da influência da variação do ângulo de pitch no desempenho de um aerogerador de pequeno porte, através de uma análise comparativa de dados experimentais. Uma pá de raio 1,5m com perfil aerodinâmico NREL S809 foi projetada a partir dos conceitos baseados na teoria do momento do elemento de pá (BEM), seguindo as premissas de operação em velocidade variável, e velocidade específica de projeto igual a 7. Os parâmetros geométricos de afilamento e torção foram definidos para construção da pá que foi usada na montagem de um protótipo experimental. O Protótipo juntamente com um sistema de aquisição de dados, foram utilizados em testes de campo com o intuito de se obter dados experimentais de operação em diferentes ângulos de pitch. Esses dados foram usados em uma análise estatística comparativa, baseada na análise de variância e no teste de médias, para avaliação do desempenho do aerogerador. Resultaram desta análise que: em intervalos de velocidade específica baixos não foram observadas diferença no desempenho do aerogerador; enquanto que nos intervalos de velocidade específica mais próximos ao de projeto houve uma diferença estatisticamente significativa entre médias, o que significa do ponto de vista físico, que a variação no ângulo de pitch afetam o desempenho do aerogerador. Observou-se ainda que o coeficiente de potência para operação em ângulo de pitch de 30,1°, mostrou-se ser maior a baixos valores de velocidade específica, o que demonstra a necessidade de um mecanismo de controle de pitch para operação a velocidades de vento e de rotações mais baixas.

Palavras-chave: Energia eólica. Pitch. BEM. Aerodinâmica. ANOVA

ABSTRACT

The pitch angle control is a widely technique used to control the aerodynamic response of a Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT). Although pitch control is found almost exclusively in large HAWTs, their use for the small ones can't be ignored, Although its use by electronic control tends to increase the cost of the wind turbine. This type of control is important to avoid turbine structural problems caused by high wind speeds, or to set the turbine tip speed ratio to its design value. This work provides a comparative study of the influence of the pitch angle variation in the performance of a small wind turbines, through a comparative analysis of experimental data. A blade with radius 1.5m and NREL S809 airfoil is designed from concepts based on the Blade Element Momentum (BEM) theory, according to variable-speed operation, and design tip speed ratio equal 7. The geometric parameters of twist and taper was defined to blade construction, that was used in the assembly of an experimental prototype. The prototype together with a data acquisition system were used in field tests in order to obtain experimental data for operation at different pitch angles. These data were used in a comparative statistical analysis, based on variance analysis and average tests, which evaluates the turbine performance. The results analysis were: at low tip speed ratio there was no difference in the turbine performance, whereas at tip speed ratio closest at design tip speed ratio there was a statistically significant difference between average values, which means that the pitch angle variation in these tip speed ratio causes a difference in the turbine performance. It was also observed that the power coefficient at operating pitch angle equal 30.1 °, proved to be higher at low tip speed ratio values, which demonstrates the necessity for a pitch control mechanism for operation at both lower wind speeds and rotational speeds.

Key words: Wind Energy. Pitch. BEM. Aerodynamic. ANOVA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cone de Expansão....24
Figura 2 - Regiões do cone de expansão....26
Figura 3 - Trajetória da massa de ar no cone de expansão....28
Figura 4 - Componentes de velocidade incidentes no elemento da pá....30
Figura 5 - Forças de Sustentação e Arrasto no perfil aerodinâmico....30
Figura 6 - Relação geométrica do perfil aerodinâmico....31
Figura 7 - Influência do número de pás no coeficiente de potência....39
Figura 8 - Turbina Eólica Típica....43
Figura 9 – Módulos da torre e primeiro teste de levantamento realizado na UFC....44
Figura 10 - Modelo de acionamento do freio a tambor na parte inferior da torre....45
Figura 11 - Fotos ilustrativas do processo de fabricação das pás....47
Figura 12 - Imagens ilustrativas dos instrumentos do sistema de aquisição de dados....49
Figura 13 - Imagens ilustrativas do Conversor e do Data Logger....52
Figura 14 - Diagrama do Sistema de Medição e Aquisição de Dados....52
Figura 15 - Campo Experimental de Mecanização Agrícola....54
Figura 16 - Montagem da torre de Sustentação....54
Figura 17 - Componentes da Torre de Sustentação....55
Figura 18 - Montagem da torre de sustentação do anemômetro....55
Figura 19- Estrutura para coleta dos dados em teste de campo....56
Figura 20 - Detalhes da montagem e ajuste do conjunto de pás....57
Figura 21 - Posicionamento e angulação das pás....57
Figura 22 - Programação do Data Logger....58
Figura 23 - Visualização instantânea das leituras do Data Logger....59
Figura 24 - Visualização ponto a ponto das leituras do Data Logger....60
Figura 25 - Manivela de acionamento do freio mecânico....61
Figura 26 - Dados coletados exportados para planilha eletrônica....20
Figura 27 - Dados coletados convertidos em suas unidades físicas correspondentes....20

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva de Afilamento da pá construída com perfil NREL S809 64
Gráfico 2 - Curva de Pitch da pá construída com perfil NREL S809 64
Gráfico 3 - Eficiência do protótipo em operação $\beta = 27{,}1°$ 66
Gráfico 4 - Eficiência do protótipo em operação $\beta = 30{,}1º$ 67
Gráfico 5 - Coeficientes de Potência médios e suas barras de erro 68
Gráfico 6 - Curva de Calibração do Tacômetro 19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros iniciais do projeto da pá.....40
Tabela 2 - Parâmetros do perfil para o projeto otimizado da pá.....42
Tabela 3 - Carregamentos atuantes na torre de sustentação.....44
Tabela 4 - Cargas consideradas no dimensionamento do eixo.....47
Tabela 5 - Especificação do Transdutor de Torque.....49
Tabela 6 - Especificação do Tacômetro.....50
Tabela 7 - Especificações do Anemômetro.....50
Tabela 8 - Configuração dos Conversores.....51
Tabela 9 - Relação de Conversão do Anemômetro.....53
Tabela 10 - Medidas de afilamento e pitch de uma pá.....63
Tabela 11 - Pontos coletado em teste experimental no CEMA.....65
Tabela 12 - Parâmetros estatísticos das amostras para velocidade específica (λ).....69
Tabela 13 - Parâmetros estatísticos das amostras para torque.....70
Tabela 14 - Parâmetros estatísticos das amostras para potência mecânica.....70
Tabela 15 - Parâmetros estatísticos das amostras para o coeficiente de potência (C_p).....71
Tabela 16 - Análise de Variância.....72
Tabela 17 - Resultado da ANOVA.....73
Tabela 18 - Resultado do Teste de MDS.....74
Tabela 19 - Calibração do Tacômetro.....18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
BEM	Blade Element Momentum
CEMA	Campo Experimental de Mecanização Agrícola
EPE	Empresa de Pesquisas Energéticas
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
LAERO	Laboratório de Aerodinâmica e Mecânica dos Fluidos
MDS	Mínima Diferença Significativa
NREL	National Renewable Energy Laboratory

LISTA DE SÍMBOLOS

A_d	Área da Seção Transversal do cone de expansão no disco rotor
A_w	Área da Seção Transversal do cone de expansão à jusante do disco rotor (ou na esteira)
A_∞	Área da Seção Transversal do cone de expansão à montante do disco rotor
a	Fator de indução de fluxo axial
a'	Fator de indução de fluxo tangencial
c	Corda da pá
C_D	Coeficiente de arrasto
C_L	Coeficiente de Sustentação
C_P	Coeficiente de Potência
CV	Coeficiente de variação
d	Diâmetro do aerogerador
F	Força
F_D	Força de arrasto
F_L	Força de sustentação
F_N	Força Normal
F_T	Força Tangencial
n	Número de elementos de pás
N	Número de pás
P	Potência
P_d^+	Pressão imediatamente antes do disco rotor
P_d^-	Pressão imediatamente após o disco rotor
Q	Torque na pá
Q'	Torque corrigido da pá
r	Raio do elemento da pá
R	Raio da pá
Re	Número de Reynolds
S	Desvio padrão
S^2	Variância

U_d Velocidade do Escoamento no disco rotor

U_w Velocidade do Escoamento à jusante do disco rotor

U_∞ Velocidade do Escoamento à montante do disco rotor (ou velocidade do vento)

$\overline{x}$ Média aritmética

W Velocidade Resultante no elemento de pá

α Ângulo de ataque da pá

α' Nível de significância requerido

β Ângulo de pitch

ϕ Ângulo de torção da pá

λ Taxa de velocidade de ponta

μ Relação entre raio do elemento e raio total da pá

μ_{ar} Viscosidade do ar

P Densidade do ar

σ_r Solidez da corda

σ Solidez da pá

Ω Velocidade angular

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 14
2 OBJETIVO..... 16
2.1 OBETIVOS ESPECÍFICOS..... 16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 17
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... 24
4.1 AERODINÂMICA DE AEROGERADORES..... 24
4.1.1 Conceitos Preliminares..... 24
4.1.2 Teoria do Momento Angular..... 27
4.1.3 Teoria do Elemento de Pá..... 29
4.1.4 Teoria do Momento do Elemento de Pá..... 32
4.1.5 Determinação do Torque e da Potência..... 33
4.2 CONCEITOS DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA 34
4.2.1 Conceitos Fundamentais 34
4.2.2 Distribuição Normal..... 36
4.2.3 Teste de Normalidade..... 36
4.2.4 Análise de Variância 36
5 METODOLOGIA..... 38
5.1 PROJETO DA PÁ..... 38
5.1.1 Definição dos Parâmetros Geométricos da Pá..... 40
5.2 COMPONENTES DO TESTE E DA AQUISIÇÃO DE DADOS..... 42
5.2.1 Protótipo Experimental..... 42
5.2.2 Sistema de Aquisição de Dados..... 48
5.3 PREPARAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL 53
5.4 ENSAIO EXPERIMENTAL 58
5.4.1 Conversão e Validação dos Dados Experimentais 61
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES 63
6.1 PROJETO DA PÁ..... 63
6.2 ENSAIO EXPERIMENTAL..... 65
6.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO 65
6.3.1 Análise Estatística..... 67
7 CONCLUSÃO..... 76

1 INTRODUÇÃO

A energia eólica, embora seja uma fonte de energia conhecida e utilizada pelo homem desde a antiguidade, tornou-se realidade na produção energética de inúmeros países nos últimos anos (YILMAZ e ÖZER, 2009). Sua viabilidade comercial aumenta conforme seus custos na geração de energia elétrica diminuem (BURTON et al., 2001), fato este devido as pesquisas na área, ao desenvolvimento tecnológico, aos incentivos governamentais, e a necessidade crescente em se utilizar fontes alternativas de energia, que sejam limpas, renováveis e comercialmente viáveis para ampliar a produção energética mundial.

Uma matriz energética pode ser composta por diversas fontes de geração, tais como: hidrelétricas, termelétricas, usinas nucleares, entre outras; que trazem com elas, conhecidas vantagens e desvantagens (YILMAZ e ÖZER, 2009). A matriz energética de um país é fundamental para o seu desenvolvimento, e sua ampliação torna-se a cada dia um novo desafio. Um dos grandes desafios atuais do Brasil é sua necessidade de crescimento energético. Além disso, há ainda o fato de que muitas áreas que não são energeticamente abastecidas pela rede de distribuição nacional, problema este que poderia ser minimizado pela implantação de pequenas usinas eólicas para geração local.

Segundo dados publicados pela Agência Nacional (OLIVEIRA, 2012), estima-se que "[...] o parque eólico do Brasil chegará a 8GW de capacidade instalada para geração de energia até 2015[...]". Segundo o presidente da EPE, "o país ocupa atualmente a vigésima posição no mundo entre os países que produzem energia a partir dos ventos, com capacidade instalada de 2 GW, e chegará a décima posição no próximo ano". Ainda segundo Oliveira, (2012) "[...] a energia eólica tem tido um crescimento expressivo no Brasil, e mostra boas perspectivas, ainda mais levando-se em conta seu preço, que caiu a um terço do que era a três ou quatro anos atrás, e já é bastante competitiva em relação às outras fontes de energia [...]".

A energia eólica é a energia contida nos ventos, que é convertida primeiramente em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, que pode ser usada para abastecimento local, de uma pequena comunidade, ou ainda introduzida na rede de distribuição.

O mecanismo de geração baseia-se na extração da energia cinética do vento que passa por um aerogerador. A presença do aerogerador no caminho do vento causa sua desaceleração, que como consequencia provoca uma queda na pressão estática do ar, a diferença de pressão gera um momento na pá do aerogerador que adquire movimento de

rotação. Esse movimento mecânico é transferido para um gerador elétrico, obtendo-se no final a energia elétrica (BURTON et al., 2001; MANWELL et al., 2002).

Contudo, o vento é uma fonte de energia instável e sofre variações que levam sua velocidade a valores mais altos ou mais baixos. Essas variações não são desejadas num sistema de conversão de energia eólica. Turbinas eólicas são projetados para operar dentro de uma determinada faixa de velocidade de vento, quando este limite é ultrapassado uma sobrecarga é imposta à turbina, podendo causar danos estruturais a mesma. Por esse motivo, quando a velocidade do vento excede o limite de projeto da turbina, sua potência de saída deve ser limitada, o que pode ser feito reduzindo-se a eficiência aerodinâmica, pela utilização de um sistema de controle sobre o ângulo de pitch (BURTON et al., 2001; MANWELL et al., 2002). A partir deste conceito buscou-se avaliar como a variação no ângulo de pitch das pás influenciaria um aerogerador de pequeno porte projetado com perfil aerodinâmico NREL S809, e por consequência como essa variação poderia afetar seu desempenho.

Primeiramente definiu-se uma pá para aerogerador de pequeno porte, de raio 1,5m e perfil NREL S809, concebida a partir da teoria momento do elemento de pá (BEM). Estabeleceu-se como premissas do projeto: o modo de operação do protótipo (velocidade específica variável), o modelo (tipo tri-pá), e a velocidade específica de projeto (λ=7). O projeto foi baseado na definição dos parâmetros geométricos: afilamento e torção ao longo da pá, que foi utilizada na montagem de um protótipo experimental de aerogerador.

O protótipo, composto de uma torre de sustentação, do rotor, e das pás; e um sistema de aquisição de dados, composto pelos instrumentos de medição e leitura, e pelos componentes de conversão e armazenamento de dados; foram utilizados em testes de campo, dos quais obteve-se os dados experimentais para dois modos de operação: em ângulo de projeto ($\beta = 27{,}1°$) e com o acréscimo de +3° ($\beta = 30{,}1°$). Estes dados foram selecionados e validados seguindo os critérios do valor mínimo da velocidade de vento e do limite da máxima potência conseguida por geradores eólicos.

A partir dos dados experimentais uma comparação estatística do desempenho do aerogerador, se deu em função da existência ou não, de normalidade dos conjuntos de dados agrupados por intervalos de velocidade específica (λ) de operação. Para os intervalos em que houve normalidade aplicou-se um teste de hipóteses sobre diferença entre médias, através de uma análise de variância de via simples (ANOVA).

Todas as considerações abordadas acima levaram a motivação do desenvolvimento deste trabalho, baseando-o no estudo do controle do ângulo de pitch para aerogeradores de pequeno porte projetadas com perfil aerodinâmico NREL S809.

2 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação foi testar a utilidade de um mecanismo de controle de pitch para aerogeradores de pequeno porte. Uma vez que, o controle da resposta aerodinâmica de um aerogerador através do controle de pitch é uma técnica empregada quase que exclusivamente para aerogeradores de grande porte, este trabalho busca avaliar a viabilidade de um mecanismo de controle de pitch para os pequenos, através da análise de desempenho do aerogerador, buscando identificar em qual ângulo este apresenta maior eficiência.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Afim de alcançar o objetivo deste trabalho promoveu-se o estudo comparativo da influência do ângulo de pitch no desempenho de um aerogerador de pequeno porte, projetado com perfil aerodinâmico NREL S809, através de uma análise comparativa de dados experimentais, coletados em testes de campo, utilizando a estatística descritiva clássica.

O trabalho experimental foi composto pelo projeto e construção das pás, projetadas com o perfil aerodinâmico NREL S809, de raio igual a 1,5m, e baseadas na teoria do BEM; pela montagem em campo de um protótipo experimental; e pela aquisição dos dados de operação deste protótipo (velocidade do vento, torque e rotação) através de um sistema de aquisição de dados.

Dispondo dos dados de operação do protótipo uma análise comparativa, baseada em estatística descritiva, foi feita buscando identificar as diferenças no desempenho do protótipo para dois ângulos de pitch: o ângulo de projeto (β=27,1°) e um acréscimo $\Delta\beta$=3°.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados trabalhos que envolvem aerogeradores numa concepção de modelagem, teste, e teoria na mesma linha adotada por esta dissertação.

Rosen & Sheinman (1994) estudaram a influência da turbulência sobre a potência média de saída de uma turbina eólica. Mostraram que a utilização de um modelo estático para calcular a potência média, que está baseado na curva de potência da turbina e na velocidade média do vento, podia resultar em erros crescentes. O artigo apresentou três modelos diferentes para calcular a potência média de saída. Tais modelos incluíram uma integração temporal direta usando dados precisos de velocidade de vento e um modelo dinâmico detalhado da turbina, uma abordagem quase-estática que levou em conta a dinâmica de vento, e um melhoramento de um modelo eficiente que também incluiu a influência das características dinâmicas da turbina. Um último modelo melhorado baseou-se num estudo da resposta da turbina a uma rajada senoidal. Todos os modelos foram comparados com medições de campo a fim de estudar a sua precisão. A comparação demonstra a importância da inclusão de todos os efeitos dinâmicos nos cálculos.

Habali & Saleh (1995) projetaram e testaram pequenas pás para turbinas eólicas com aerofólios mistos. O trabalho discutia o bom desempenho que os perfis da série NACA apresentavam para a época, e ao mesmo tempo relatava as melhorias que eram necessárias na porção interna deles, afim de torná-los suficientemente espessos, por razões estruturais, e mantê-los com sua boa capacidade de sustentação. Relata os diversos perfis da série NACA e da série LS e aponta as vantagens e desvantagens de cada um deles na construção de uma pá do ponto de vista aerodinâmico. Foram discutidos os parâmetros geométricos e as características estruturais dos perfis utilizados na construção das pás, tais como: comprimento, distribuição da espessura, distribuição do comprimento de corda, torção, e a conexão com a raiz. Foram feitos testes de desempenho comparando-se a quantidade de energia efetivamente conseguida com aquela prevista pela teoria, usando a relação potência versus velocidade do vento. Foi demonstrado que para pás de até 5m de comprimento, dois aerofólios diferentes misturados a partir do terço externo no comprimento da pá seriam suficientes e apresentavam boa resistência e boas características aerodinâmica. O projeto do rotor das pás foi executado usando fibra de vidro reforçada e então instalado em uma turbina de 15kW com pitch controlado. Um teste de carregamento estático indicou que a pá poderia resistir a

carregamentos de até dez vezes o valor do impulso normal de trabalho, e um teste de desempenho de campo mostrou o projeto teve um coeficiente de potência médio medido de 41,2%.

Wright & Wood (2004) estudaram a partida de turbinas eólicas de pequeno porque sob baixas velocidades de vento. Utilizam uma turbina de 3 pás e 2m de diâmetro. Realizam testes de campo e os comparam com cálculos feitos pela teoria do elemento de pá. Seu objetivo é melhorar a análise existente e comparar os resultados com as medições de uma turbina cujo torque resistivo foi caracterizado muito melhor do que o previsto. Além disso, os experimentos abrangem uma ampla gama de velocidade do vento. Mostram que o comportamento de partida é muito bem previsto pela análise do elemento de pá usando uma combinação de dados interpolados e expressões genéricas para sustentação e arrasto em ângulos de incidência elevados. Sugerem que pequenas turbinas são mais susceptíveis aos efeitos de instabilidade. Como parte dos resultados mostram que a velocidade do vento de partida medida foi 4,6 m/s, usando a combinação de sustentação e arrasto foi de 4,7 m/s, e usando as equações 5,6 m/s. Concluem que mesmo que a pá tenha sua partida, ainda poderá haver um tempo considerável antes que se atinja a velocidade angular na qual a potência começa a ser produzida, o que geralmente é definido pelo sistema de controle e é independente da velocidade do vento.

Jaucha et al., (2007) realizam o controle no ângulo de pitch para uma turbina eólica de velocidade fixa com stall ativo usando um controlador tipo PID. A proposta do controlador é garantir a estabilização do sistema de potência. O desempenho do controlador é testado por simulação, onde o modelo de turbina e o controlador são conectados a um modelo de sistema de potência. Para o projeto do controlador PID empregam o método de locus da raiz usando uma função de transferência. Fazem um estudo da variação do ângulo de pitch em relação a velocidade do vento, e concluem que para velocidades entre 7 e 11 m/s o ângulo de pitch assume os maiores valores e é neste ponto que requer o maior controle. A conclusão final do trabalho é que para o tipo de turbina testada um sistema de controle de pitch é capaz de amortecer as oscilações do sistema de potência, e ainda que o amortecimento na oscilação da frequência não é possível em toda a gama de operação da turbina.

Senjyu et al. (2007) propuseram um método baseado no controle do ângulo de pitch, para reduzir as flutuações da potência de saída em parques eólicos. O trabalho apresentou uma

estratégia de controle do nível da potência de saída para um parque eólico baseado tanto na média quanto no desvio padrão dessa potência, usando uma estratégia de controle cooperativo para os aerogeradores e o controle do ângulo de pitch através de um controlador preditivo genérico (CPG). Compararam um sistema convencional de controle da potência de saída, através do controle do ângulo de pitch, com o sistema proposto. O método proposto determinou a suavização do comando da potência de saída usando lógica "fuzzy" com base em uma fórmula de saída aproximada e na informação da velocidade de vento. Além disso, o ângulo de pitch de cada aerogerador foi controlado para todas as regiões de operação por um CPG. Assim, o método proposto pôde determinar o comando de potência de saída correspondente para variações bruscas na velocidade do vento. Os resultados da simulação usando um modelo detalhado real para sistemas eólicos mostrou a eficácia do método proposto.

Alvarez et al. (2008) projetaram uma pá para um aerogerador de eixo horizontal de pequeno porte e testaram o desempenho da turbina através de uma simulação computacional utilizando o método dos volumes finitos. No trabalho foram utilizadas pás projetadas segundo a teoria do momento do elemento de pá (BEM), com raio de 1,5m, e perfil aerodinâmico NACA 4412, que é um perfil com alta sustentação mesmo a baixas velocidades de vento (até 5m/s). Deste projeto foram obtidas a geometria da pá pela determinação do afilamento (corda x raio) e da torção (torção x raio), que foram utilizadas na modelagem tri-dimensional do aerogerador. Para a simulação do escoamento foi gerada uma malha não uniforme e tetraédrica, utilizando-se o algoritmo NETGEN. Essa malha mostrou-se adequada nas simulações de escoamento utilizando o Método dos Volumes Finitos.

Camblong (2008) propõe o projeto de um controlador R-S-T para regular o ângulo de pitch de uma turbina eólica de velocidade variável. O trabalho apresenta a curva de potencia em relação a taxa de velocidade de ponta para diferentes valores de ângulo de pitch. Apresenta a metodologia para a concepção do controlador digital baseado nas características aerodinâmicas da turbina.

Kasmi & Masson (2008) propõem um novo modelo para simulação de escoamento em turbina eólica de eixo horizontal. O modelo proposto usa um termo extra adicionado à equação de transporte aproximada para a taxa de dissipação de energia da turbulência. Esse termo apresenta a taxa de transferência de energia da turbulência de larga escala para a turbulência

de pequena escala na região de esteira próxima do rotor. Simulam o escoamento no entorno da turbina incluindo tanto as regiões de esteira mais próximas quanto as mais afastadas do rotor. Utilizam um modelo numérico baseado no modelo do disco atuador, e combinado com o RANS, para o cálculo do escoamento nas proximidades da turbina, incluindo a região de esteira próxima e afastada. Empregam o FLUENT na resolução do modelo. Realizam um estudo de dependencia de malha. Os resultados apresentados mostram que o método proposto traz resultados melhores que o tradicional modelo k-ε, particularmente na região de esteira próxima. Isso se deve principalmente ao termo de tranferência de energia introduzido na equação de taxa de dissipação.

Thumthae & Chitsomboon (2009) realizam uma simulação numérica para uma HAWT com pás sem torção com o objetivo de determinar o melhor ângulo de ataque para a máxima potência de saída. Modelaram a turbina como uma malha estática e uma dinâmica, e observam que a primeira é mais precisa para um estudo de transientes, enquanto a segunda é mais apropriada para o estado estacionário, que acaba sendo a utilizada na simulação. Na simulação adotaram o método dos volumes finitos e uma malha não estruturada, empregando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$. Simularam a solução com o domínio de apenas uma pá. Na malha da camada limite da pá empregam a função de parede. Realizam uma avaliação de y^+ para verificar a dependência da malha. Como Resultados chegaram a conclusão de que em cerca de 80% do raio da pá os resultados numéricos ficaram muito próximos dos experimentais, enquanto que em 30% do comprimento os resultados não corresponderam. A conclusão final diz que o ângulo de ataque ótimo para pás sem torção pode ser definido no ponto de sustentação máxima do perfil.

Yilmaz & Özer (2009) sugerem que o controle do ângulo de pitch seja o método mais eficiente e popular para controlar a potência em turbinas eólicas de velocidade variável, e que novos métodos de controle têm sido propostos com o objetivo de reduzir os problemas causados pelas altas velocidades de vento. Em seu trabalho propõem um controle de pitch baseado numa rede neural artificial. Realizam a simulação de uma turbina de velocidade variável e analisam sua operação usando dois tipos de controladores. Basicamente utilizam a diferença entre o erro de torque (ou da potência) desejado e o real para gerar um sinal, que é usado para regular o ângulo de pitch. Utilizaram dois tipos de controlador: um controle preditivo generalizado e um controle PID. As principais vantagens desses controladores,

segundo os autores, são sua fácil adaptação para diferentes condições e sua rápida capacidade de resposta . Como resultados conseguiram demonstrar que a potência de saída foi regulada com sucesso para altas velocidades de vento, e que assim um super carregamento na turbina foi evitado.

Renergy (2010) apresentou uma reportagem sobre a diversificação da matriz energética do Brasil, na qual apresentou inúmeros dados a respeito da produção atual e futura de energia proveniente de fontes alternativas e renováveis dentre estas a energia eólica. Segundo o artigo a energia eólica tem sido a principal aposta na diversificação da matriz energética do Brasil. Este tipo de energia, foi a responsável pelo maior número de projetos cadastrados no Leilão de Energia de Reserva, da Empresa de Pesquisa Energética - EPE - que ocorreu em agosto de 2010. Contudo, dados levantados pela própria revista mostraram que a potência elétrica instalada no Brasil no mesmo ano era de 107.000 MW, dos quais apenas 0,71% provenientes da energia eólica, cuja concentração de usinas está na região nordeste, que é favorecida por suas condições climáticas e geográficas. Dados do leilão de Energia de Reserva mostrou que o estado com maior número de projetos cadastrados foi o Rio Grande do Norte, com 133 centrais eólicas, seguido do Ceará com 106, totalizando 6.217 MW de potência. Em 2001, um levantamento feito a pedido do Ministério de Minas e Energia, mostrou que o potencial eólico brasileiro era de 143,5 GW. Este estudo levou em consideração a força dos ventos, o clima, o solo e realizou simulações nos campos de vento para até 50 metros de altura. O uso de usinas eólicas a nível mundial deu um salto no ano de 2010, com a produção de mais de 37.500 MW de energia elétrica, o que representou um aumento de 42% em relação ao ano anterior. O destaque foi da China, que dobrou sua capacidade de produção nesse tipo de geração, atingindo 25.800 MW instalados. Apesar disso, as fontes alternativas estão longe de ser a matriz vigente, visto que, o modelo mundial de matriz energética ainda está baseado em fontes derivadas de combustíveis fósseis.

Rocha et al. (2011) desenvolveram uma bancada de testes que faz o levantamento da curva de potência para pás de aerogeradores. As pás foram projetadas a parir do método do momento do elemento de pá (BEM) e perfil NREL S809, construídas e posteriormente duas destas pás foram montadas em uma turbina de 50 cm de diâmetro. Esta turbina foi testada sendo submetida a uma condição de vento de velocidade média 3,8 m/s, produzido a partir de um ventilador de coluna com potência igual a 200W. Resultou do teste o levantamento da curva de desempenho da turbina, que se mostrou apropriada para pequenos aerogeradores operando

a baixas velocidade de vento. Os resultados mostraram que o perfil NREL S809 foi bastante satisfatório no que diz respeito ao seu desempenho aerodinâmico, e pôde-se concluir que este perfil é adequado para utilização em aerogeradores que operam em locais com grandes variações na velocidade do vento, visto que mostraram bom desempenho em uma larga faixa de velocidades específicas.

Carneiro et al. (2012) desenvolveram um método de fabricação de pás para aerogeradores com até 3m de diâmetro. Tal método foi baseado nos conceitos de praticidade e viabilidade econômica, e por isso a escolha do material empregado foi fundamental. Foram utilizados materiais de fácil acesso no mercado local, tais como madeira balsa, tubos de alumínio, fibra de vidro, resina epóxi e tinta epóxi. Um dos principais objetivos no desenvolvimento do método foi a definição de um sistema de referências capaz de replicar a curva de torção e o afilamento o mais fiel possível do projeto teórico, calculado pela Teoria do momento do elemento de pá (BEM). As pás foram divididas em seções transversais ao eixo de rotação, das quais cada seção constituiu uma nervura com um comprimento de corda e ângulo de ataque do aerofólio pré-definido. Estas nervuras foram unidas por uma longarina estrutural central. O conjunto foi recoberto com chapas de madeira balsa de 1mm de espessura e reforçado com fibra de vidro e resina epóxi. Para um bom acabamento os conjuntos foram pintados com tinta epóxi, visando a garantia da máxima de resistência às intempéries dos testes em campo. As pás foram testadas sob esforço estático mostrando boa resistência mecânica.

Rocha et al. (2012) analisaram e compararam a eficiência de sete métodos numéricos na determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull para a geração de energia eólica na região nordeste do Brasil. Para determinar o potencial de vento da região através de uma análise estatística foi preciso adquirir os registros de velocidade do vento, que foram coletados em duas cidades do estado do Ceará. Os dados da velocidade do vento são a base para a distribuição de Weibull, que pode ser descrita como uma função de densidade de probabilidade e de uma função de distribuição cumulativa. Para estimar os parâmetros da distribuição Weibull sete métodos numéricos foram utilizados e comparados entre si a fim de verificar qual destes seria o mais adequado. Para analisar a eficiência dos métodos foram empregados os testes RMSE (raiz do erro médio quadrado), X^2 (qui-quadrado) e R^2 (análise de variância ou a eficiência do método). Dessas análises resultaram que os métodos que utilizavam iterações numéricas para determinar o parâmetro de forma (k) e o parâmetro de escala (c) da distribuição de Weibull apresentam uma curva melhor ajustada ao histograma de

velocidade do vento. Foi observado ainda, que o numérico método da energia equivalente mostrou-se inteiramente adequado para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull.

Singh & Ahmed (2012) projetaram e testaram o desempenho de uma pá para uma turbina eólica de pequeno porte utilizada em aplicações a baixas velocidades de vento, que geralmente apresentam problemas de desempenho devido à separação laminar e as bolhas de separação laminar sobre as pás, fato este devido ao baixo número de Reynolds (Re) resultante das baixas velocidades de vento e do pequeno tamanho do rotor. O uso de um perfil aerodinâmico especialmente projetado para baixos Re permite uma partida em baixas velocidades de vento, aumentando o torque de arranque e, assim, melhorando o desempenho global da turbina. O artigo apresentou os resultados do projeto e do desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte, estimada em 400 W, com 1,26 m de diâmetro, roto bi-pá, para aplicações a baixos Re na faixa de velocidade de vento entre 3 e 6 m/s, empregando o perfil AF300. O teste experimental variou o ângulo de pitch das pás em 15°, 18° e 20° afim de estudar o desempenho e a velocidade de vento de partida. Verificou-se que o melhor desempenho da turbina ocorreu no angulo de pitch igual a 18°. Em média, a turbina produziu um coeficiente de potência (C_P) de 0,255, a uma altura de 8,22 m, e velocidade do vento de 6 m/s com pitch de 18°. Em comparação com um rotor tri-pá o modelo bi-pá apresentado pelo artigo, produziu mais energia elétrica na mesma velocidade de corrente livre.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

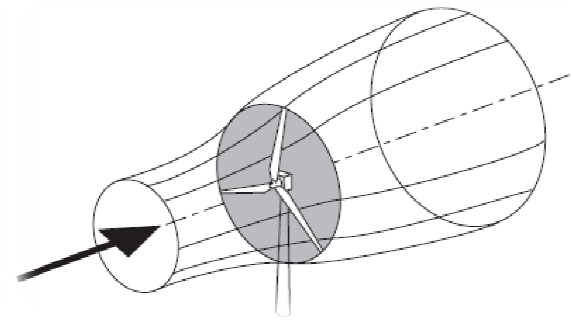
Neste capítulo é apresentada toda a fundamentação teórica em que esta dissertação está baseada. Primeiramente são apresentados os conceitos fundamentais referente ao estudo da aerodinâmica aplicada a aerogeradores, bem como as teorias inerentes ao seu movimento, as forças oriundas desse movimento, a teoria do momento do elemento de pá na qual todo o projeto desta dissertação está baseado, os conceitos do torque e potência alcançados por um aerogerador idealizado. Em seguida, é apresentada uma breve descrição dos conceitos fundamentais de estatística descritiva clássica, cuja as analises de desempenho do aerogerador, objetivo principal deste trabalho, estão baseadas.

4.1 AERODINÂMICA DE AEROGERADORES

4.1.1 Conceitos Preliminares

Um aerogerador é um dispositivo que extrai energia cinética do vento. A remoção dessa energia provoca a desaceleração da massa de ar que passa através do aerogerador, como conseqüência disso, uma região de fronteira entre a camada de ar afetada e a não afetada se forma no entorno, a montante e a jusante do aerogerador, criando um tubo de escoamento de seção circular. A taxa do fluxo de massa ao longo do tubo não varia. Uma vez que a massa de ar desacelera sem sofrer compressão; ao encontrar com o aerogerador sua secção transversal expande, essa expansão é necessária para acomodar o movimento mais lento do ar, dando origem a uma área conhecida como cone de expansão (BURTON et al., 2001). A Figura 1 ilustra o cone de expansão.

Figura 1 - Cone de Expansão



Fonte: figura extraída de Burton et al., (2001, p.42)

Utilizando o conceito do cone de expansão e admitindo a hipótese de que a região de ar afetada pelo aerogerador não se mistura com a região não afetada é possível criar um volume de controle em todo o cone, onde o ar se conserva na direção do escoamento.

A massa de ar percebe a presença do aerogerador antes mesmo de encontrar com ele e sofre uma desaceleração gradual de forma que quando o ar chega ao aerogerador sua velocidade já é menor do que a velocidade do fluxo livre (também chamada de velocidade do vento). A pressão estática do ar imediatamente antes do aerogerador aumenta para compensar a queda da energia cinética, o ar passa então através do aerogerador e sofre uma queda de pressão abaixo do nível da pressão atmosférica. Atrás do aerogerador forma-se uma região de esteira caracterizada por ser uma área de pressão estática e velocidade reduzidas.

Analisando o cone de expansão da Figura 1 nota-se a existência de três áreas de seção transversal distintas: no inicio do cone; na região do aerogerador (onde se encontra o disco atuador); e na região de esteira. A equação (1) representa a taxa do fluxo de massa em todo o volume de controle.

$$\rho A_\infty U_\infty = \rho A_d U_d = \rho A_w U_w \tag{1}$$

A maneira como a velocidade do escoamento diminui em cada região do cone de expansão está associada ao fator de indução de fluxo axial (*a*). As equações (2) e (3) demonstram essa relação, enquanto a Figura 2 representa as regiões no cone de expansão e suas respectivas velocidades.

$$U_d = U_\infty (1-a) \tag{2}$$

$$U_w = U_\infty (1-2a) \tag{3}$$

A variação que ocorre na velocidade do ar ao passar através do disco atuador provoca uma variação de momento no disco (equação (4)), e a força que causa essa variação de momento surge da diferença de pressão através do disco, demonstrada na equação (5).

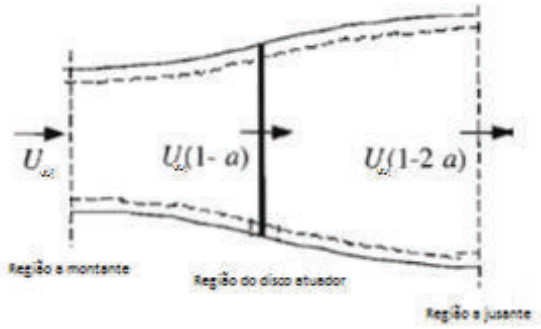
$$\left(U_\infty - U_w\right)\rho A_d U_d \tag{4}$$

$$F = \left(P_d^+ - P_d^-\right) A_d = \left(U_\infty - U_w\right)\rho A_d U_\infty \left(1-a\right) \tag{5}$$

Outro conceito importante que envolve a teoria de um aerogerador é o coeficiente de potência (C_P), que por definição é a relação entre a potência mecânica extraída pelo eixo rotor e a potência disponível na corrente livre de ar não perturbado na área varrida pelo aerogerador, ou seja, a energia cinética disponível no vento, conforme mostra a equação (6).

$$C_P = \frac{P}{P_\infty} \tag{6}$$

Figura 2 - Regiões do cone de expansão



Fonte: figura adaptada de Manwell et al., (2002, p. 85)

Como a força causada pela diferença de pressão no disco atuador está concentrada nele, a taxa do trabalho realizado por esta força e, portanto, a extração da potência do ar (BURTON et al., 2001), é dada pela equação (7), e assim o coeficiente de potência (equação (6)) passa a ser expresso em termos do fator de indução de fluxo axial (a) conforme indicado na equação (8).

$$P = FU_d = 2\rho A_d U_\infty^3 a\left(1-a\right)^2 \tag{7}$$

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty{}^3 A_d} = 4a(1-a)^2 \tag{8}$$

Segundo Manwell et al., (2002), a explicação para tal limite está no fato de que o escoamento do ar através do disco atuador corresponde a um tubo de corrente de ar com uma área de seção transversal a montante deste (A_∞) no valor de $2/3$ da área do disco (A_d), que se expande em duas vezes a área do disco a jusante dele. Assim sendo, o projeto de um

aerogerador estará limitado a um coeficiente de potência máximo ($C_{P\max}$), no valor de $16/27$, conhecido como limite de Betz.

Isso significa dizer que a condição para que um aerogerador opere alcançando a máxima potência possível é aquela onde o fator de indução de fluxo axial (a) atinge o valor de $1/3$.

Para Burton et al., (2001), a força no disco atuador, causada pela queda de pressão (equação (5)), pode ser adimensionalizada para se obter um coeficiente de empuxo (C_T), apresentado na equação (9).

$$C_T = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2 A_d} = 4a(1-a) \tag{9}$$

Para Manwell et al., (2002), o coeficiente de empuxo (C_T) em um aerogerador ideal, será máximo e igual a 1 quando o fator de indução de fluxo axial (a) valer $1/2$, e a velocidade na esteira for igual a 0. Quando o fator de indução de fluxo axial (a), assumir valores maiores ou iguais a $1/2$ a teoria do momento não se aplica, e outros conceitos devem ser levados em consideração.

Contudo, Manwell et al., (2002) diz que, embora o limite de Betz seja o máximo valor teórico possível para o coeficiente de potência (C_P), na prática três efeitos causam a diminuição desse valor, são eles:

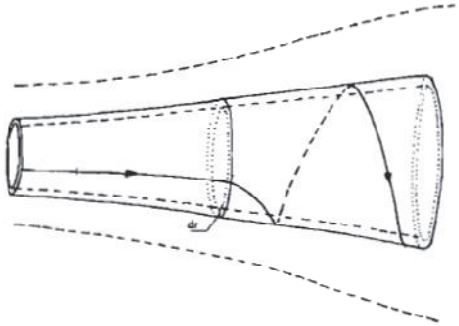
a) a rotação na esteira;
b) o número finito de pás, associado às perdas de ponta;
c) o arrasto aerodinâmico não nulo.

4.1.2 Teoria do Momento Angular

Um aerogerador real é formado por um rotor com um número finito de pás rotativas que giram em torno de um eixo perpendicular ao plano do rotor e paralelo à direção do vento. O movimento de rotação das pás proporciona um torque no rotor na direção da rotação, ao mesmo tempo um torque igual e oposto é imposto ao ar. Como consequência da reação o ar deve adquirir uma rotação no sentido oposto à do rotor, ganhando momento angular e assim a velocidade do ar na esteira passa a ser composta por duas componentes: a

componente axial, e a componente tangencial à rotação. A rotação do ar que sai do disco atuador se mantém constante ao longo da esteira, e está representada na Figura 3.

Figura 3 - Trajetória da massa de ar no cone de expansão



Fonte: figura extraída de Manwell et al., (2002, p. 89)

A transferência de movimento rotacional para o ar ocorre por toda a espessura do disco atuador, e a variação da velocidade tangencial é expressa em termos do fator de indução de fluxo tangencial (*a'*), definido na equação (10).

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \tag{10}$$

É importante ressaltar que quando a rotação na esteira passa a ser considerada na análise do movimento, a velocidade induzida no disco atuador passa a ser composta não somente pela componente de velocidade axial ($U_\infty a$), mas também por uma componente tangencial ($r\Omega a'$).

A velocidade tangencial, assim como a axial, variam ao longo do raio do disco atuador. Essa variação causa uma variação no momento angular por todo o comprimento do disco, e por isso, quando se considera que o disco é uma somatória de anéis analisados independentes um do outro, o torque em cada anel será a própria taxa de variação do momento angular na esteira, como demonstra a equação (11).

$$dQ = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho U_\infty \Omega r^2 2\pi r dr \tag{11}$$

A potência no anel (equação (12)) é função dos fatores de indução de fluxo axial e tangencial, que determinam a magnitude e a direção do fluxo de ar no plano do disco atuador;

e da velocidade específica (λ), que é a relação entre a velocidade de ponta da pá (ΩR) e a velocidade de corrente livre de ar (U_∞), dada pela equação (13).

$$dP = dQ\Omega \tag{12}$$

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U_\infty} \tag{13}$$

Desta forma, o coeficiente de potência (C_P) em cada anel anular pode ser expresso em termos da derivada da potência, como indica a equação (14).

$$dC_P = \frac{dP}{\frac{1}{2}\rho A_d U_\infty^{\ 3}} \tag{14}$$

4.1.3 Teoria do Elemento de Pá

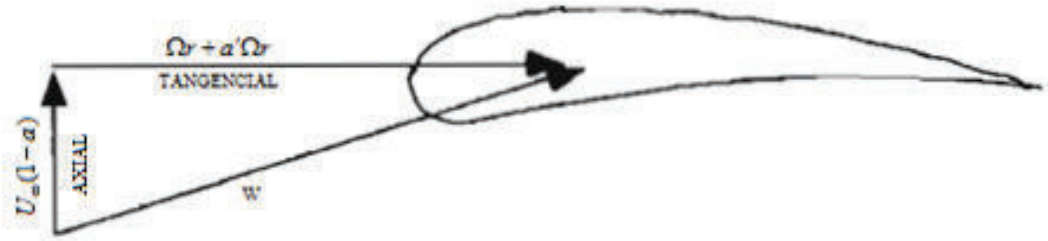
A teoria do elemento de pá assume que a pá é composta por *n* elementos, e que não há interação aerodinâmica entre eles. Além disso, garante que as forças atuantes sobre a pá podem ser calculadas considerando-se somente as características de sustentação e arrasto do perfil aerodinâmico da pá.

Sobre o elemento de pá atuam duas componentes de velocidade: a componente radial, dada pela velocidade do vento; e a componente tangencial, que é uma combinação da velocidade rotacional com a velocidade angular (induzida pela conservação do momento angular), resultando num vetor velocidade na direção do plano de rotação do elemento. A Figura 4 ilustra o triângulo de velocidades que incide em cada elemento da pá. Como resultante às duas componentes está o vetor *W*, indicado pela equação (15).

$$W = \sqrt{\left(U_\infty\left(1-a\right)\right)^2 + \left(\Omega r\left(1+a\right)\right)^2} \tag{15}$$

As forças que atuam sobre a pá são funções da sustentação, do arrasto, e do ângulo de ataque (α) do perfil, representados na Figura 5.

Figura 4 - Componentes de velocidade incidentes no elemento da pá



Fonte: figura adaptada de Manwell et al., (2002, p. 105)

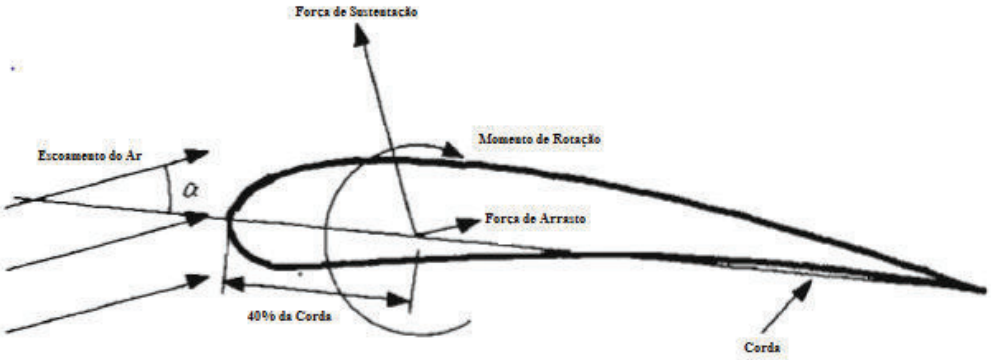
A Força de sustentação (F_L) é definida como sendo a força perpendicular à resultante da velocidade (W). Ocorre devido à diferença de pressão que há entre a superfície superior e a inferior do perfil. Está representada na equação (16).

$$\delta F_L = \frac{1}{2}\rho W^2 c C_L \delta r \tag{16}$$

A Força de arrasto (F_D) é definida como sendo a força paralela à resultante da velocidade (W). Ocorre devido às forças de atrito viscoso na superfície do perfil, e também devido à diferença de pressão na superfície do perfil , ou seja, na frente e na traseira do perfil. Está representada na equação (17).

$$\delta F_D = \frac{1}{2}\rho W^2 c C_D \delta r \tag{17}$$

Figura 5 - Forças de Sustentação e Arrasto no perfil aerodinâmico



Fonte: figura adaptada de Manwell et al., (2002, p. 97)

Tanto o coeficiente de sustentação (C_L) quanto o coeficiente de arrasto (C_D) são características do perfil aerodinâmico e dependem da forma deste e do número de Reynolds (Re) característico do escoamento. São obtidos quase sempre através de experimentos práticos em túnel de vento.

As forças normal (F_N) e tangencial (F_T) surgem das projeções das forças de sustentação e arrasto em relação ao ângulo de torção da pá (ϕ). As forças normal e tangencial estão representadas nas equações (18) e (19) respectivamente.

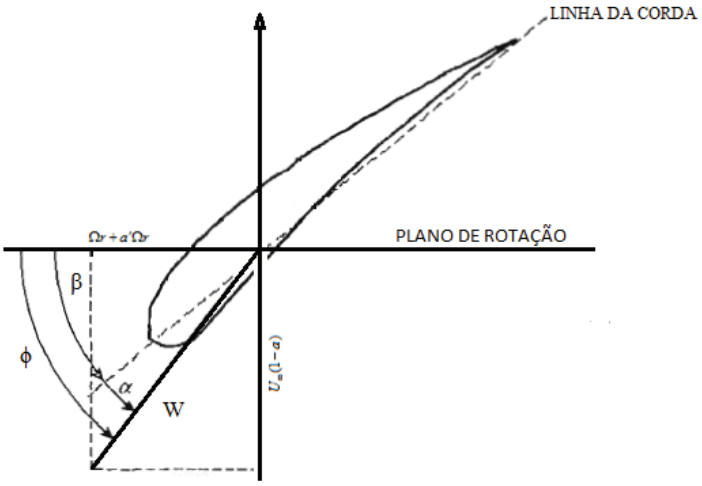
$$\delta F_N = \delta F_L \cos\phi + \delta F_D sen\phi \tag{18}$$

$$\delta F_T = \delta F_L sen\phi - \delta F_D \cos\phi \tag{19}$$

Segundo Manwell et al., (2002), o ângulo de ataque (α) da pá é medido entre a linha da corda e a resultante da velocidade (W); o ângulo de pitch (β) é medido entre a linha da corda e seu plano de rotação; e o ângulo de torção do perfil (ϕ) é medido entre o plano de rotação do perfil e a resultante da velocidade (W). A equação (20) mostra a relação geométrica entre os ângulos. A relação geométrica de um perfil aerodinâmico é mostrada na Figura 6.

$$\phi = \alpha + \beta \tag{20}$$

Figura 6 - Relação geométrica do perfil aerodinâmico



Fonte: figura adaptada de Manwell et al., (2002, p. 108)

4.1.4 Teoria do Momento do Elemento de Pá

A teoria do Momento do Elemento da Pá (Blade Element Momentum Theory - BEM) assume que a força no elemento de pá é a única responsável pela variação do momento do ar que passa através da área representada por um anel circular varrido pelo elemento. Como consequência disso não há interação entre fluxos de anéis contíguos, condição essa que só poderá ocorrer se o fator de indução de fluxo axial (a) não variar radialmente. Segundo Burton et al., (2001), na prática essa condição não é possível, mas experimentalmente há resultados que mostram que é aceitável. A teoria do BEM aplica as equações definidas pela teoria do elemento de pá buscando a geometria idealizada de uma pá e otimizando seu desempenho.

A Força normal (F_N) nas N pás, dada pela equação (21), deve ser igual à taxa de variação do momento axial (I) acrescida de uma força axial extra (II) devida à queda de pressão na esteira, e está indicada pela equação (22).

$$dF_N = \frac{1}{2} Nc\rho W^2 \left(C_L \cos\phi + C_d sen\phi \right) dr \tag{21}$$

$$\frac{1}{2} Nc\rho W^2 \left(C_L \cos\phi + C_d sen\phi \right) dr = \underbrace{4\pi\rho U_\infty^2 a(1-a) r dr}_{I} + \underbrace{\pi\rho (2a'\Omega r)^2 r dr}_{II} \tag{22}$$

O torque (dQ) produzido nas N pás será função da força tangencial (F_T), dada pela equação (23), e da taxa de variação do momento angular, e está demonstrado na equação (24).

$$dF_T = \frac{1}{2} c\rho W^2 \left(C_L sen\phi - C_d \cos\phi \right) dr \tag{23}$$

$$dQ = NrdF_T = 4\pi\rho U_\infty (\Omega r a')(1-a) r^2 dr \tag{24}$$

Da manipulação das equações (22) e (24) obtém-se as relações para os fatores de indução de fluxo axial (a) e tangencial (a'). Esses fatores são dependentes dos coeficientes de sustentação (C_L) e de arrasto (C_D) do perfil, que por sua vez, são funções não lineares do ângulo de ataque (α), e estão simplificados nas equações (25) e (26).

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{\sigma_r}{4\lambda_r sen\phi} C_L \tag{25}$$

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma_r}{4sen^2\phi} C_L \cos\phi \tag{26}$$

Segundo Manwell et al., (2002) na prática para o cálculo dos coeficientes de indução de fluxo o coeficiente de arrasto (C_D) pode ser igualado a zero. Burton et al., (2001) afirma que o arrasto causado por uma fricção da superfície, não afeta a queda de pressão através do disco atuador, por isso não deve ser considerado na determinação dos fatores de indução de fluxo. Eles afirmam ainda que a teoria do BEM é aplicável somente se as pás têm circulação uniforme, ou seja, se (a) é constante.

Dois conceitos importantes devem ser recordados: a solidez da pá (σ), que é definida como sendo a área total da pá dividida pela área do disco rotor, e que é um parâmetro primário na determinação do desempenho do rotor (BURTON et al., 2001); e a solidez da corda (σ_r) que é definida como o comprimento da corda num dado raio dividido pelo comprimento de circunferência no raio, como mostra a equação (27):

$$\sigma_r = \frac{N}{2\pi}\frac{c}{r} \tag{27}$$

4.1.5 Determinação do Torque e da Potência

O torque produzido na pá, como mencionado na seção anterior, é calculado utilizando a força tangencial, equação (23), para as *N* pás. Contudo deve-se levar em conta os efeitos do arrasto sobre a superfície, que gera um torque contrário sobre a pá. De acordo com Burton et al., (2001) os efeitos do arrasto no cálculo do torque não devem ser desconsiderados. Desta forma a equação (24) é corrigida pela equação (28).

$$dQ' = 4\pi\rho U_\infty(\Omega r a')(1-a)r^2 dr - \frac{1}{2}\rho W^2 N c C_D \cos\phi r \delta r \tag{28}$$

Assim sendo, o coeficiente de potência passa a ser aquele explicitado pela equação (29).

$$C_P = \frac{Q'\Omega}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^3 \pi R^2} \tag{29}$$

Segundo Burton et al., (2001) o coeficiente de potência máximo deve ocorrer na velocidade específica (λ) na qual o fator de indução de fluxo axial (a) se aproxima do limite de Betz.

Para velocidades específicas (λ) pequenas o fator de indução de fluxo axial (a) pode alcançar valores muito inferiores a $1/3$ e o ângulo de ataque do perfil (α) valores muito altos levando a pá a uma condição de estol. O mais comum na prática é que a condição de estol ocorra na raiz da pá devido ao fato do ângulo de pitch (β) não ser grande o suficiente nessa região, limitado por condições de fabricação. Por outro lado quando a velocidade específica é grande, o fator de indução de fluxo axial também atingirá valores mais altos, enquanto o ângulo de ataque terá valores muito pequenos, nesta situação o arrasto passa a predominar. Portanto, para valores extremos de velocidade específica (λ) o arrasto será alto e o fator de indução de fluxo axial não apresentará valores ótimos (ou seja, próximos do limite de Betz) o que causa uma queda no coeficiente de potência (BURTON et al., 2001).

4.2 CONCEITOS DA ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A estatística descritiva é aquela que tem por objetivo descrever os dados observados em uma população ou amostra (SILVA et al., 1999). Tem por objetivo sintetizar uma série de valores de mesma natureza, permitindo que se obtenha uma visão global da variação desses valores. Alguns dos conceitos fundamentais da estatística descritiva clássica são apresentados a seguir.

4.2.1 Conceitos Fundamentais

A média aritmética ($\overline{x}$) é o valor central dos valores observados de uma determinada variável, e é dada pela equação (30) onde X_i é o valor da variável e n é a quantidade de valores da amostra.

$$\overline{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} X_i}{n} \tag{30}$$

A variância (S^2) de uma determinada variável é a medida da sua dispersão estatística, o que significa dizer que a variância mede o quão longe os valores de determinada variável estarão de um valor esperado. A variância é dada pela equação (31) onde: X_i é o valor da variável; $\overline{x}$ é a média aritmética; e n é a quantidade de valores da amostra.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \overline{x} \right)^2}{n-1} \tag{31}$$

O Desvio Padrão (S), que é também uma medida de dispersão estatística, mede a variação dos valores de uma amostra em relação à sua média. É determinado extraindo-se a raiz quadrada da variância, como mostra a equação (32).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(X_i - \overline{x} \right)^2}{n-1}} \tag{32}$$

O coeficiente de variação (CV) é uma medida de dispersão usada para estimar a precisão de um experimento. Esta medida avalia o quanto representa o desvio-padrão em relação à média aritmética de uma amostra. Pode ainda ser utilizado na comparação da variabilidade de duas ou mais amostras, com relação à sua média aritmética. Está representado pela equação (33).

$$CV = \left(\frac{S}{\overline{x}} \right) \times 100 \tag{33}$$

Sua principal qualidade é a capacidade de comparação de distribuições diferentes. Quanto menor for o CV, mais homogêneo será o conjunto de dados, ou seja, há baixa dispersão na amostra e sua média é representativa. Enquanto que, quanto maior for o CV menos homogêneo será o conjunto de dados, havendo uma alta dispersão na amostra e portanto, sua média não será representativa (FREITAS, 2011).

4.2.2 Distribuição Normal

A distribuição normal, também conhecida como distribuição de Gauss, é uma distribuição de probabilidade usada para variáveis aleatórias continuas, obtidas por mensuração. Segundo Montgomery et al., (2003, p.108) se em um experimento for assumido que cada medição realizada será uma réplica de um experimento aleatório, então a distribuição normal poderá ser usada para se obter conclusões aproximadas desta média. A distribuição normal surge do estudo de numerosos fenômenos físicos.

A distribuição normal é uma das distribuições fundamentais da moderna teoria estatística. A vantagem da distribuição normal reside na facilidade de defini-la com apenas dois parâmetros, a média ($\overline{x}$) e o desvio padrão (S) da distribuição (FREITAS, 2011, p.2).

4.2.3 Testes de Normalidade

Os testes de normalidade são usados para determinar se um conjunto de dados de uma variável, é bem modelado por uma distribuição normal ou não.

Dentre os testes de normalidade encontram-se o teste de simetria e o teste de curtose, que são testes de forma. A Simetria testa a posição em relação à média, enquanto a Curtose é definida como sendo o grau de achatamento de uma distribuição normal.

Quando um conjunto de dados de uma variável é dado como normal, o seu desvio padrão é uma medida representativa da dispersão e assim sendo, é possível fazer uma análise de variância desta amostra.

4.2.4 Análise de Variância

Um teste de hipóteses é um método amplamente empregado quando utiliza-se estatística em tomadas de decisão. Conforme afirmação de Montgomery et al., (2003, p.278, tradução nossa) "[...] o teste de hipóteses é um dos mais usuais aspectos da inferência estatística, uma vez que muitos tipos de problemas de tomada de decisão, testes, ou experimentos no mundo da engenharia podem ser formulados como problemas de testes de hipóteses".

Geralmente, um teste de hipóteses assume que uma proposição inicial seja verdadeira, e então testa essa proposição usando dados de uma amostra. Em um teste de hipóteses considera-se duas possibilidades: a hipótese nula e a hipótese alternativa. A primeira

é a proposição inicial e está quase sempre baseada no conhecimento prévio daquilo que se analisa, enquanto a segunda é a hipótese que julga-se ser diferente da verdadeira (MONTGOMERY et al., 2003).

A hipótese nula para o teste é aquela na qual não há diferenças estatisticamente significativas entre as médias, enquanto a hipótese alternativa atesta que há diferenças estatisticamente significativas entre as médias da população em análise.

A análise de variância, ou ANOVA, é um teste de hipóteses que verifica se as médias de várias populações são iguais. O método é uma extensão do t-teste, também chamado t-Student, especificamente para o caso em que as variações da população são consideradas iguais. Pode ser usada para avaliar se existem diferenças estatisticamente significativas entre as médias (MEET MINITAB 15, 2007).

No programa Minitab15 a ANOVA adota o teste F, que é qualquer teste de significância que envolva a distribuição F, tal como o teste de hipóteses sobre as variâncias ou os desvios-padrão, de duas distribuições normais independentes.

A distribuição F é uma distribuição de probabilidade onde a variável aleatória F é definida como sendo a relação de duas variáveis aleatórias qui-quadradas independentes, cada qual dividida pelo seu número de graus de liberdade (MONTGOMERY et al., 2003, pg.355).. A distribuição F em sua forma, é muito parecida com a distribuição do qui-quadrado, no entanto, os dois parâmetros referentes ao grau de liberdade fornecem uma maior flexibilidade sobre forma.

5 METODOLOGIA

Este capítulo contém a metodologia empregada nesta dissertação. Primeiramente são apresentados os detalhes do projeto da pá, bem como a descrição dos componentes utilizados no desenvolvimento do protótipo experimental de um aerogerador de pequeno porte e também dos componentes utilizados em um sistema de aquisição de dados. Em seguida é apresentada a metodologia aplicada ao ensaio experimental e ao tratamento estatístico dos dados obtidos nos testes de campo.

5.1 PROJETO DA PÁ

Ao se projetar uma pá para aerogerador deve-se considerar fundamentalmente o seu desempenho, isso significa que a pá deve ser projetada de forma a maximizar a potência de saída do rotor, minimizando perdas e garantindo ao sistema máxima eficiência.

O projeto de uma pá deve levar em consideração não só a teoria que a envolve, mas também os aspectos construtivos que podem tornar-se dificultadores e até inviabilizar um projeto, seja pelo aspecto financeiro, ou por alguma outra limitação que impeça sua construção e/ou operação. Para Manwell (2002, p. 113, tradução nossa) "as pás devem ser projetadas para uma fabricação simples de forma a garantir seu desempenho em toda a gama de velocidade do vento e velocidade do rotor que possa vir a encontrar".

Ao iniciar o projeto da pá algumas premissas devem ser definas. A primeira delas é o modo de operação do aerogerador, que é um grande fator de influência para um projeto otimizado (BURTON et al., 2001).

Neste trabalho, um aerogerador operando a velocidade rotacional variável é o adotado. Além disso, é preciso especificar o modelo do aerogerador conforme o número de pás utilizadas e o perfil aerodinâmico empregado na construção dessas pás.

Um aerogerador tri-pá foi o escolhido uma vez que este modelo é predominante no mercado, possui tecnologia e eficiencia comprovadas. Segundo Hau (2006) em uma comparação feita entre os vários conceitos de turbinas eólicas, o tipo tri-pá é o que apresenta a melhor relação entre coeficiente de potência (C_P) e velocidade específica (λ).

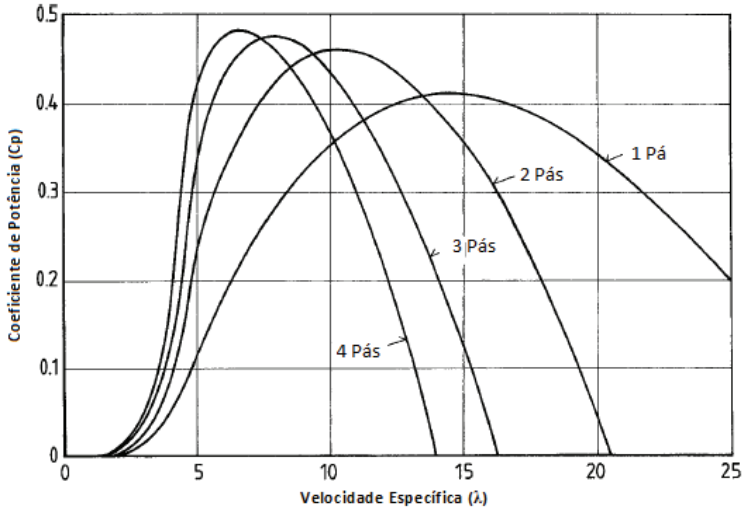
O perfil aerodinâmico empregado neste trabalho é o S809 do NREL, que foi desenvolvido especificamente para aplicações em turbinas eólicas de eixo horizontal. É um

perfil de fluxo laminar, desenvolvido para garantir máxima sustentação e baixos arrastos. Maiores detalhes sobre o perfil NREL S809 podem ser obtidos em NREL (1997).

Outro parâmetro importante é a determinação da velocidade específica (λ), definida pela equação (13). Para que um aerogerador operando à velocidade rotacional variável alcance o máximo coeficiente de potência (C_P), este deve ser capaz de manter sua velocidade específica (λ) constante, independentemente da velocidade do vento (BURTON et al., 2001) que é variável e aleatória.

De acordo com Hau (2006, p. 121) um aerogerador do tipo tri-pá encontra seu ponto de máxima eficiência em valores de velocidade específica (λ) de projeto entre 7 e 8. Tal afirmação pode ser observada na Figura 7 que demonstra a variação das curvas de potência em relação a velocidade específica (λ) para aerogeradores com diferentes números de pás.

Figura 7 - Influência do número de pás no coeficiente de potência de um aerogerador em função da velocidade específica ótima



Fonte: Figura adaptada de Hau (2006, p.121)

Neste projeto um valor de velocidade específica (λ) igual a 7 é adotado. Os parâmetros iniciais para o projeto da pá são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros iniciais do projeto da pá

Parâmetros de Projeto	
Modo de Operação	Velocidade Rotacional Variável
Perfil aerodinâmico	NREL S809
Velocidade Específica (λ)	7
Nº de pás (N)	3
Nº de elementos (n)	20[1]
Raio da pá (R)	1,50 (m)

5.1.1 Definição dos Parâmetros Geométricos da Pá

Para determinar a geometria da pá é necessário encontrar a variação da corda, chamada afilamento, e também a distribuição do ângulo de pitch (β), ambos ao longo da pá.

Em um projeto otimizado, ou seja, aquele em que o coeficiente de potência máximo é alcançado, algumas condições devem ser impostas ao se projetar a pá, conforme afirma Manwell (2002, p.110). Tais condições são:

a) que não haja rotação na esteira;
b) que não haja arrasto;
c) que o fator de indução de fluxo axial seja o próprio limite de Betz ($a = 1/3$);
d) que o fator de indução de fluxo tangencial seja nulo ($a' = 0$);
e) que não haja perdas devido ao número finito de pás.

A medida da corda (c) em cada elemento da pá pode ser determinada através de sua solidez (σ_r) (equação (27)), da velocidade específica local (λ_r), e do coeficiente de sustentação (C_L). Para isso é necessário determinar os fatores de indução de fluxo axial (a) e tangencial (a'), conforme mostra equação (34), onde μ é a relação entre o raio do elemento e o raio da pá ($\mu = r/R$).

$$\sigma_r \lambda C_L = \frac{N}{2\pi}\frac{c}{r}\lambda C_L = \frac{4\lambda^2\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + \left(\lambda\mu\left(1+a'\right)\right)^2}} \tag{34}$$

[1] O primeiro elemento da pá ($n = 1$) é desconsiderado devido à interferência dele com o rotor na montagem do protótipo.

A relação entre o fator de indução de fluxo axial (a) e o tangencial (a') é determinada dividindo-se a equações (25) e (26) uma pela outra, e após uma sequência de simplificações algébricas a equação (35) é conseguida. Para detalhes do cálculo envolvido na determinação desta relação consultar Burton et al., (2001, p. 62 a 70).

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \tag{35}$$

É importante ressaltar que a equação (35) está baseada na teoria do BEM, que prediz que a influência do arrasto será desconsiderada na determinação dos fatores de indução de fluxo. Ainda com base nesta teoria, para um projeto otimizado adota-se o limite de Betz para o fator de indução de fluxo axial ($a = 1/3$).

Embora os efeitos do arrasto sejam desconsiderados na determinação dos fatores de indução de fluxo e na geometria da pá, Burton et al., (2001) afirma que não devem ser negligenciados nos cálculos de torque e potência da pá.

O ângulo de torção (ϕ) varia ao longo da pá, e é encontrado pela relação geométrica dos vetores de velocidade (ver Figura 4), e está demonstrado pela equação (36).

$$\tan\phi = \frac{(1-a)}{\lambda\mu(1+a')} \tag{36}$$

A distribuição do ângulo de pitch (β) pode ser encontrada utilizando-se a relação entre ângulos dada pela equação (20). Para isso, além da determinação do ângulo de torção (ϕ) é necessário encontrar o ângulo de ataque (α) da pá. Segundo Burton et al. (2001) se o coeficiente de sustentação (C_L) deve ser constante tal que o arrasto seja minimizado então o ângulo de ataque (α) também deverá ser constante.

O ângulo de ataque (α) é um parâmetro característico do perfil aerodinâmico, e para um projeto otimizado deve ser encontrado a partir do valor de coeficiente de sustentação (C_L) ótimo, que é conseguido na máxima relação entre coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto (C_L / C_D) para um determinado Número de Reynolds (BURTON et al., 2001, p. 169).

O perfil NREL S809 foi testado para alguns números de Reynolds típicos na operação de aerogeradores. Destes o Reynolds mais próximo ao estimado para a operação do

protótipo experimental empregado neste trabalho, foi o $\mathrm{Re} = 3 \times 10^5$. Com base neste número pôde-se então determinar os valores para o C_L ótimo e ângulo de ataque (α), que são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros do perfil para o projeto otimizado da pá

Parâmetros do Perfil NREL S809 para Projeto Ótimo	
Re	$3x10^5$
$C_{l\text{ótimo}}$	0,748
$\alpha_{\text{ótimo}}$	6,11°

Fonte:Dados obtidos por Butterfiel (1992) - túnel de vento da *Colorado State Univety* conforme apresentado em Lopes (2011)

Desta forma, a geometria da pá pode ser definida empregando-se as equações (34), (36), e (20) para cada elemento da pá.

5.2 COMPONENTES DO TESTE E DA AQUISIÇÃO DE DADOS

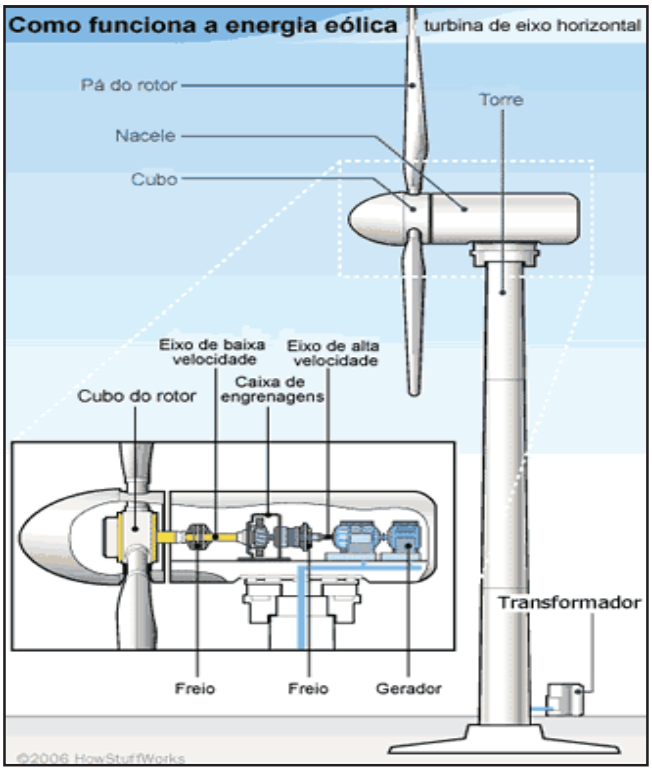
Para avaliar o desempenho do aerogerador segundo a proposta deste trabalho, é preciso realizar testes experimentais (ou testes em campo), com posterior análise estatística comparativa. Para isso, há necessidade de um protótipo experimental de aerogerador, bem como de um sistema de aquisição de dados. Este último permite que os dados obtidos em campo possam ser posteriormente utilizados na análise e avaliação dos resultados.

5.2.1 Protótipo Experimental

Uma turbina eólica convencional é composta basicamente por uma torre de sustentação: que posiciona e suporta o rotor em alturas pré-definidas cujas condições de vento no local da instalação sejam favoráveis ao desempenho da turbina; por uma nacele: que acomoda e protege o conjunto gerador, composto basicamente por caixa de engrenagens, freio, eixos e gerador, e os sistemas de controle e de giro; por um cubo: que suporta as pás transferindo torque e rotação ao eixo da turbina, e acomoda sistemas de controle e proteção; pelas pás eólicas: que são as responsáveis pela conversão da energia cinética contida no vento em energia mecânica no cubo do rotor; pelo transformador: que faz a conversão da energia

gerada pela turbina para valores compatíveis àqueles definidos na subestação do parque eólico. A Figura 8 ilustra uma turbina eólica típica.

Figura 8 - Turbina Eólica Típica



Fonte: figura extraída de Lopes (2011, p. 28)

Para realização dos testes experimentais em ambiente acadêmico, desenvolveu-se o protótipo de um aerogerador, de forma que fosse viável sua fabricação, instalação, e operação, com os recursos disponíveis ao LAERO. Este protótipo contém as seguintes partes: torre de sustentação; freio; pás de teste; eixo do rotor; e eixos das pás.

É importante ressaltar que todos os componentes do protótipo experimental foram projetados a partir da concepção de que o protótipo possa ser usado para diversos testes de campo. Portanto, valores de projeto aqui apresentados referem-se à condição de operação extrema, que não é necessariamente condição de operação adotada neste trabalho.

5.2.1.1 Torre de sustentação

Construiu-se uma torre de sustentação com altura de 5m, dividida em quatro módulos, com o objetivo de facilitar seu transporte, montagem e desmontagem. A torre é fixada ao solo através de uma base, e presa com quatro cabos de aço posicionados a 3,5m de

altura (em relação ao solo) de forma que não haja interferência com as pás de 1,5m de raio (LOPES, 2011). Esses cabos são presos a estaios fincados no solo. Figura 9 ilustra as partes que compõem a torre de sustentação.

Figura 9 – Módulos da torre e primeiro teste de levantamento realizado na UFC.

Fonte: imagens extraídas de Lopes (2011, p. 54)

Para projetar a torre, realizou-se um estudo com base em dados de empuxo e de peso dos componentes suportados por ela, afim de prevenir os efeitos da flambagem sobre a mesma. Os carregamentos atuantes e o dimensionamento da torre foram definidos com base na carga referente ao peso dos componentes, tais como: rotor, freio, base, e instrumentos; na carga devido ao empuxo, calculado de acordo com a teoria do BEM (componente vertical da reação dos estaios ao empuxo); e na pré-carga dos estaios. A Tabela 3 resume as cargas atuantes consideradas no projeto.

Detalhes sobre o dimensionando e fabricação da torre e da base, assim como a definição dos cabos de aço, podem ser obtidas em Lopes (2011, p. 48-54).

Tabela 3 - Carregamentos atuantes na torre de sustentação

Tipo de Carregamento	**Valor**
Peso dos componentes	262,8 (N)
Empuxo	389,2 (N)
Pré-Carga dos estaios	196,2 (N)
Carga Total	**903,9 (N)**

Fonte: Dados extraídos Lopes (2011, p. 48-54)

5.2.1.2 Freio

O freio proposto ao protótipo experimental tem duas funções principais: a primeira delas é atuar como freio do conjunto de pás proporcionando a parada do rotor, quando esta se faz necessária, durante os testes de campo, sua segunda função é permitir a avaliação de desempenho do aerogerador através da medição do torque gerado no eixo do rotor. Trata-se de um conjunto de freio mecânico de sapata com retorno por ação de mola, opção adotada por ser simples e com baixo custo de fabricação, que confere a confiabilidade necessária para a aplicação. O acionamento do conjunto se dá através de cabo de aço acionado através de um conjunto de tambor com catraca e alavanca, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Modelo de acionamento do freio a tambor na parte inferior da torre.

Fonte: Imagem extraída de Lopes (2011, p. 68)

Os critérios de operação do freio estão baseados na condição de operação extrema, que segundo a teoria do BEM ocorre quando o coeficiente de torque (C_Q) é máximo. O freio mecânico foi projetado para suportar 20% a mais da carga de operação imposta ao sistema quando a velocidade de vento é de $10\,m/s$. O torque de frenagem máximo é de $72{,}16\,Nm$, e está de acordo com o torque gerado pelas pás, que corresponde a $71{,}69\,Nm$.

O cabo de aço de acionamento do freio é um cabo do tipo 3/32", com coeficiente de segurança previsto de 3,7.

Detalhes sobre o dimensionamento do freio mecânico e do cabo de acionamento podem ser obtidos em Lopes (2011, p. 63-68).

5.2.1.4 Pá de teste

As pás são parte fundamental do conjunto de componentes de um aerogerador, uma vez que a eficiência deste dependerá, em grande parte, da eficiência com que estas pás serão capazes de extrair energia do vento.

Assim sendo, a construção das pás está baseada, entre outras coisas (como seu projeto), em garantir resistência, agregando à pá o menor peso possível. Com base nesses parâmetros, o material empregado em sua fabricação deve ser selecionado de forma a garantir tais características, além de permitir a viabilidade da construção do ponto de vista financeiro e operacional (CARNEIRO et al., 2012).

Os materiais precisam ter custo compatível com o orçamento, preferencialmente de fácil aquisição, que possam ser trabalhados com ferramentas e equipamentos comuns, fáceis de serem manuseados, e acima de tudo que garantam as propriedades mecânicas e as características aerodinâmicas necessárias à pá. Desta forma, o emprego de fibras de vidro reforçadas com resinas de poliéster, resina epóxi, fibra de carbono e alguns tipos de madeira de baixa densidade, são os principais materiais empregados na construção das pás deste protótipo (LOPES, 2011) e de outras pás utilizadas em outros trabalhos do LAERO.

As pás usadas neste protótipo possuem 3,0 m de diâmetro, medida viável para uma fabricação artesanal, e puderam ser feitas nas instalações do LAERO. A determinação do diâmetro das pás segundo Lopes (2011), baseia-se no fato que haver pouca quantidade de pesquisa para aerogeradores de pequeno porte com dados experimentais, utilizando pás de tamanhos similares ao adotado. A Figura 11 mostra algumas imagens do processo de fabricação das pás.

A resistência e rigidez das pás foram determinadas de forma experimental. Para isso, fabricou-se primeiramente uma pá para que fosse submetida a um ensaio destrutivo. Segundo Lopes (2011), a carga prevista a qual a pá deve ser capaz de suportar sem colapsar está baseada na teoria do BEM para a condição de máximo empuxo, ou seja, quando λ=8 e a velocidade do vento é de 10m⁄s. A carga de empuxo no rotor equivale a 389,2 N, o que implica numa carga total por pá de 129,72 N.

Detalhes a respeito do teste de carregamento estático executado para avaliação da pá empregada, podem ser obtidos em Lopes (2011, p. 68-71), enquanto os detalhes construtivos são apresentados em Lopes (2011, p. 94-100).

Figura 11 - Fotos ilustrativas do processo de fabricação das pás

Fonte: imagens extraídas de Lopes (2011).

5.2.1.5 Eixo do Rotor

O eixo do rotor é o responsável por absorver as cargas aerodinâmicas, as cargas de torque de frenagem, e as cargas de seu próprio peso, assim como as cargas de seu eventual desbalanceamento. Possui diâmetro de 24 mm, com dois ressaltos de 25 mm (para rolamentos), e é construído em aço SAE 1020. Seu projeto considera condições de estática e de fadiga. Segundo Lopes (2011), o projeto do eixo está baseando nas definições de carregamento com informações extraídas do método BEM. As cargas atribuídas ao eixo são resumidas na Tabela 4.

Tabela 4 - Cargas consideradas no dimensionamento do eixo

Tipo de Carregamento	**Valor**
Carga Estática	121,64 (N)
Torque de Frenagem	71,69 (N)
Carga de desbalanceamento	13 (N)
Carga de Empuxo (ou compressão axial)	389,2 (N)

Quanto às condições de fadiga, considera-se o carregamento relativo ao peso próprio do rotor, das pás, e do freio aerodinâmico acrescido da carga de desbalanceamento. Detalhes de projeto, dimensionamento, e fabricação podem ser obtidos em Lopes (2011, p. 71-80).

5.2.1.6 Eixo das Pás

O eixo da pá recebe cargas aerodinâmicas de torque de frenagem e empuxo, e está projetado para as condições de estática e de fadiga. Neste componente a carga predominante é o empuxo, portanto seu projeto está baseado no ponto em que o coeficiente de empuxo (C_T) seja máximo.

O eixo fabricado com aço SAE 1020, tem um diâmetro de 24 mm com dois ressaltos de 25 mm (para rolamentos). Possui um prolongamento que é instalado dentro da estrutura da pá, ficando ancorado por um maciço de resina epóxi (LOPES, 2011). As condições de resistência foram avaliadas somente para a parte do eixo externo a pá, conforme justifica Lopes (2011).

O eixo da pá é submetido a três tipos de cargas: as cargas de empuxo, aquelas geradas pelo torque, a as cargas oriundas da força centrífuga da rotação da pá. Segundo Lopes (2011), o valor do coeficiente de segurança à fadiga é adequado para operações em curtos períodos de tempo (até 200 horas). Outros detalhes de projeto, dimensionamento, e fabricação podem ser obtidos em Lopes (2011, p. 80-85).

5.1.2.4 Demais componentes

Detalhes sobre outros componentes empregados na construção do protótipo experimental que, não por serem menos importantes, mas por serem menores, não são apresentados nesta dissertação, e podem ser obtidos em Lopes (2011).

5.2.2 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é formado por um conjunto de componentes que tem como função medir os dados de potência mecânica do eixo (*P*), e da energia disponível no vento (P_∞), com o objetivo de se determinar o coeficiente de potência (C_P) do aerogerador, e assim possibilitar a avaliação do desempenho aerodinâmico para cada variação

no ângulo de pitch, que é a proposta deste trabalho. A relação entre coeficiente de potência, potência mecânica e energia foi demonstrada anteriormente pela equação (6).

Para a aquisição dos dados em campo é preciso incluir no protótipo experimental um sistema de aquisição e medição de dados, composto por: torquímetro, tacômetro, e anemômetro, respectivamente ilustrados na Figura 12. A conversão e o armazenamento dos dados são feitas por um sistema composto por: conversor Analógico/Digital, Data Logger, e Computador.

Figura 12 - Imagens ilustrativas dos instrumentos do sistema de aquisição de dados

Transdutor de Torque

Tacômetro

Anemômetro

Fonte: Imagens retiradas de Lopes (2011).

Para aquisição da medida de torque no eixo rotor utiliza-se um transdutor de torque de boa precisão acoplado ao eixo. Segundo Lopes (2011, p.38) "[...] a geração de contra torque para viabilização de sinal do transdutor é promovida através de um sistema clássico de freio de sapata atuando por cabo de aço e polias de desvio, com alivio por mola de tração". As especificações do transdutor de torque são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Especificação do Transdutor de Torque

Transdutor de Torque	
Modelo	HBM T22
Erro	$\leq \pm$ 0,3%
Faixa de Operação	0 - 200 (Nm)

Para aquisição da medida de rotação do eixo utiliza-se um tacômetro tradicional de fabricação nacional. Este instrumento utiliza um sensor indutivo de proximidade montado próximo ao eixo de rotação. As especificações do componente são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Especificação do Tacômetro

Tacômetro	
Modelo	TADIG
Erro	≤ 0,8%
Faixa de Operação	0 a 10000 (rpm)
Modelo do Sensor	PS4-12GI50-E2

Para aquisição das medidas de velocidade e direção do vento utiliza-se um anemômetro ultrassônico, que garante alta precisão das medidas. O equipamento é importado da fabricante GILL, tipo Windmaster. É construído de alumínio e fibra de carbono e pode realizar medidas de velocidade de vento superiores a 45 m/s. Seu principio de funcionamento baseia-se na diferença de tempo em que um pulso ultrassônico leva para ir do transdutor superior ao seu oposto inferior, vice-versa. As especificações deste componente são apresentadas na Tabela 7. Detalhes a respeito do anemômetro podem ser vistas em www.gill.co.uk.

Tabela 7 - Especificações do Anemômetro

Anemômetro	
Modelo	1590 PK-20
Modelo do Sensor	PS4-12GI50-E2
Velocidade do Vento	
Faixa de Operação	0 - 45 m/s
Resolução	0.1 ou 0.001 m/s
Erro (a 12 m/s)	< 1,5% RMS
Direção	
Faixa de Operação	0 - 359,9º
Resolução	1º ou 0.1º
Erro (a 12 m/s)	2º

Uma vez que os instrumentos do sistema de aquisição de dados fornecem as medidas das grandezas físicas em forma de tensão e/ou corrente, torna-se necessário traduzi-las de forma que possam ser interpretadas e analisadas. Os instrumentos de leitura fornecem respostas em forma de sinais analógicos, que devem ser convertidos em sinais digitais. Além

disso os dados precisam ser compilados e armazenados para posterior utilização. Para isso empregam-se dois conversores Analógico/Digital e um Data Logger.

O conversor, do fabricante PICO Techonology, Modelo EL 037, é um conversor de sinais do tipo analógico/digital de quatro canais com três configurações de entrada possíveis: $2{,}5[V]$, $10[V]$, ou $4-20[mA]$. Na configuração proposta por Lopes (2011) um dos conversores está dedicado ao tratamento do sinal do anemômetro, que requer quatro canais, e o outro conversor é utilizado para as saídas do transdutor de torque e do tacômetro, que utilizam um canal cada. A Tabela 8 ilustra o esquema de montagem dos conversores.

Tabela 8 - Configuração dos Conversores

ESQUEMA DE CONFIGURAÇÃO DA MONTAGEM			
Nº Conversor	**Canais Utilizados**	**Equipamento**	**Sinal de Entrada**
1	CH1, CH2, CH3, CH4	Anemômetro	0 - 10 V
2	CH1	Transdutor de Torque	0 - 10V
	CH2	Tacômetro	4 - 20 mA

O Data Logger, modelo EL 005 Enviromon, também do fabricante PICO Techonology, tem como função armazenar os dados convertidos em forma de sinais digitais. Este instrumento recebe as leituras dos dois conversores na freqüência de $1Hz$ e compila a média destas leituras em intervalos de 1min. armazenando, desta forma, a média de 60 leituras consecutivas. Conversor e Data Logger são ilustrados na Figura 13.

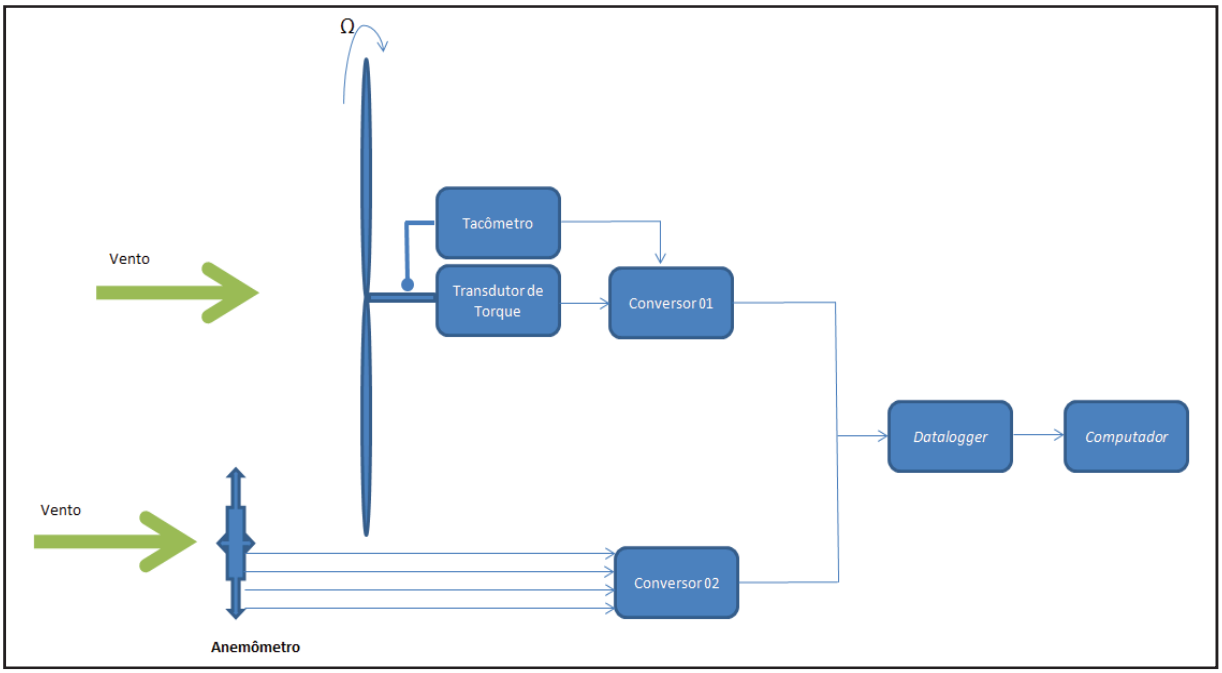
O acesso aos dados de campo é conseguido através de um computador carregado com o programa ENVIROMON, disponibilizado pelo fabricante para download através do site www.picotech.com, e de um cabo de comunicação Serial/USB.

A Figura 14 ilustra com um diagrama esquemático o funcionamento do sistema de aquisição e medição de dados.

Figura 13 - Imagens ilustrativas do Conversor e do Data Logger

Fonte: Fotos tiradas no LAERO em 16 de março de 2012

Figura 14 - Diagrama do Sistema de Medição e Aquisição de Dados



Fonte: Figura retirada de Lopes, (2011)

A definição das grandezas físicas (torque, rotação e velocidade do vento), a escolha dos equipamentos, a configuração e montagem do sistema de aquisição de dados, foram estabelecidas e validadas em trabalhos anteriores realizados no LAERO[2].

Para utilização em campo os equipamentos são agrupados e protegidos por uma caixa com vedação apropriada. Sua configuração e montagem pode ser vista em Azevedo (2011).

[2] Todos os equipamentos foram previamente testados em bancada no LAERO e tiveram sua funcionalidade confirmada. Maiores detalhes podem ser obtidos em: (LOPES, 2011) e (AZEVEDO, 2011).

5.2.2.1 Calibração dos Componentes

Para a validação e conversão dos dados coletados em campo, faz-se necessário proceder uma calibração nos instrumentos. Através da calibração é possível obter uma relação de conversão que é adotada para transformar os dados coletados em forma de tensão e corrente em unidades físicas aplicáveis ao trabalho em questão.

O Anemômetro, conforme indicado em manual do fabricante, vem calibrado de fábrica e portanto não é necessário nenhum procedimento extra para validar suas leituras. A relação de conversão do anemômetro está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação de Conversão do Anemômetro

Relação de Conversão para o modelo 1590 PK-20	
Tensão Medida (V)	**Velocidade Correspondente (m/s)**
0	-20
2,5	0
5,0	20

A calibração do torquímetro e a obtenção de sua relação de conversão, se deu em bancada de teste no LAERO. Detalhes a respeito deste procedimento podem ser obtidos em (AZEVEDO, 2011 p. 29).

Contudo para validação das medidas do tacômetro e a determinação de sua relação de conversão, foi necessário proceder com uma recalibração no instrumento, detalhes desta podem ser vistos no Anexo A.

5.3 PREPARAÇÃO DO ENSAIO EXPERIMENTAL

O protótipo experimental para os testes de campo foi montado em área cedida pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, denominado Campo Experimental de Mecanização Agrícola - CEMA, mostrado na Figura 15.

A montagem do protótipo experimental consiste primeiramente em fixar no terreno a base da torre de sustentação e os quatro estaios, posicionados de forma a garantir o posicionamento da torre. Em seguida monta-se a torre formada pelos quatro módulos unidos entre si por parafusos. No topo da torre, instala-se o freio mecânico e o sistema de aquisição

de dados, composto pelo transdutor de torque e pelo sensor indutivo do tacômetro; todos esses componentes são mantidos sob uma caixa de proteção. Conectado ao freio posiciona-se o eixo do rotor, e o mancal que suporta as pás. Os cabos elétricos dos sensores e o cabo de aço de acionamento do freio passam por dentro da torre, conectando seus componentes. Uma veleta é posicionada na parte posterior da caixa de proteção com o objetivo de dar direção ao movimento de rotação da pá. As Figuras 16 e 17 ilustram a montagem da torre de sustentação e de seus componentes.

Figura 15 - Campo Experimental de Mecanização Agrícola

Fonte: Foto tirada no CEMA em 26 de março de 2012.

Figura 16 - Montagem da torre de Sustentação

Fonte: Foto tirada no CEMA em 12 de março de 2012.

Figura 17 - Componentes da Torre de Sustentação

Fonte: Fotos tiradas no CEMA em 12 de março de 2012.

Figura 18 - Montagem da torre de sustentação do anemômetro

Fonte: Fotos tiradas no CEMA em 03 de abril de 2012.

Além da torre de sustentação, é necessária a instalação de uma torre auxiliar dedicada ao posicionamento e sustentação do anemômetro. Essa torre, mostrada na Figura 18, é fixada tal como a torre de sustentação: por meio de estaios e cordas de naylon; e posicionada à frente dela a fim de garantir a leitura dos dados de velocidade do vento em corrente livre. O anemômetro é fixado em sua torre através de um suporte e um cabo de comunicação interliga o instrumento com o sistema de aquisição de dados.

Para o sistema de aquisição de dados é necessário a instalação de uma estrutura de apoio que permita mantê-lo protegido das intempéries do tempo (sol e chuva). Esta estrutura é mostrada na Figura 19. Para funcionamento do sistema de aquisição de dados é necessário uma fonte de energia elétrica.

Figura 19- Estrutura para coleta dos dados em teste de campo

Fonte: Fotos tiradas no CEMA em 03 de abril de 2012

É importante ressaltar que a área de montagem do protótipo foi escolhida levando-se em conta a questão da turbulência do ar. O CEMA dispunha de uma grande área aberta (como demonstra a Figura 15), de forma que o vento que chegou ao aerogerador e ao anemômetro durante os testes de campo não sofreu influência de obstáculos, tais como: árvores, prédios, entre outros. As construções existentes atrás do aerogerador (que podem ser vistas na Figura 19) não causaram influencias aos testes.

Como última etapa na montagem do protótipo experimental, instala-se o conjunto de pás de testes e a veleta. As pás foram fixadas no mancal por meio de braçadeiras e parafusos. Para cada ângulo testado, um novo gabarito e um reposicionamento das pás foi necessário. A Figura 20 mostra o conjunto de pás e sua montagem.

As pás devem ser posicionadas e fixadas no mancal respeitado o ângulo de pitch adotado em cada coleta de dados. Para isso, um gabarito para cada ângulo é colado em cada uma das pás e estas ajustadas ao mancal de forma que a linha do ângulo de pitch do gabarito fique posicionada paralelamente ao mancal, garantindo desta forma a correta angulação das pás. A Figura 21 ilustra o posicionamento e angulação de uma pá durante sua montagem em campo.

Figura 20 - Detalhes da montagem e ajuste do conjunto de pás

Fonte: Fotos tiradas no CEMA em 29 de março de 2012

Finalizando a montagem do protótipo experimental conectam-se os cabos de comunicação de cada sensor com a caixa do sistema de aquisição de dados, e inicia-se a coleta dos dados do teste em campo.

Figura 21 - Posicionamento e angulação das pás

Fonte: Fotos tiradas no CEMA em 10 de abril de 2012

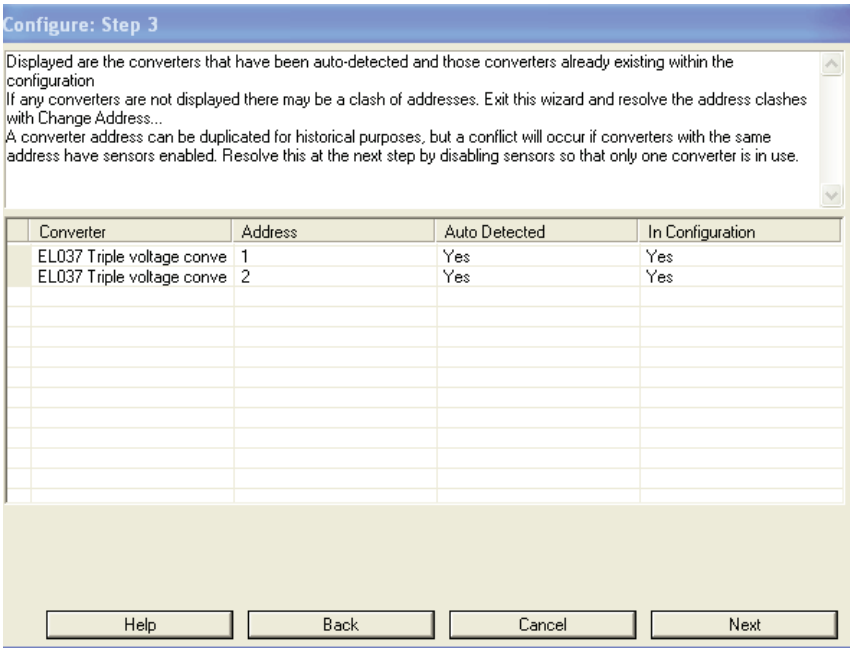
5.4 ENSAIO EXPERIMENTAL

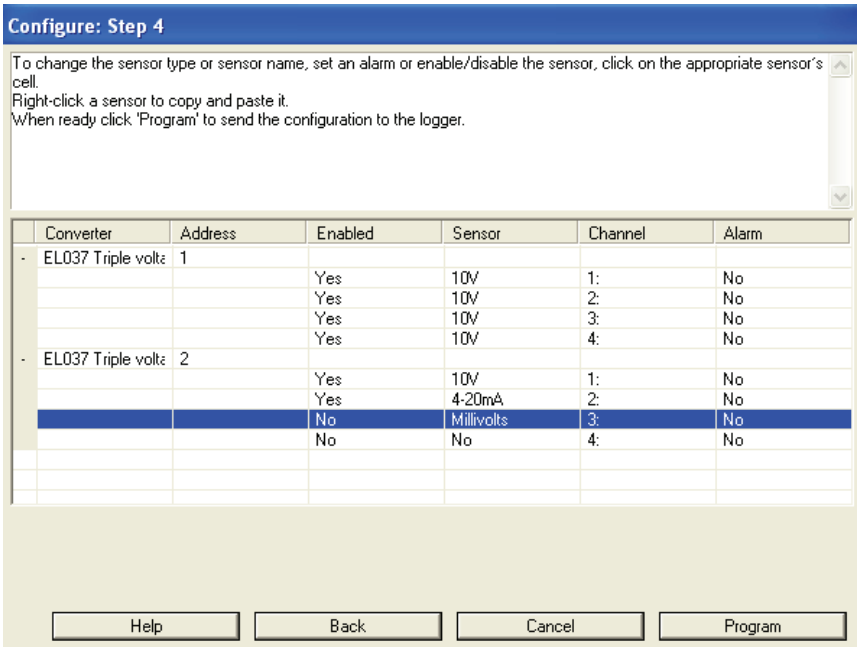
A aquisição de dados em campo consistiu em, através do sistema de aquisição de dados, obter pontos de operação do protótipo experimental.

Cada ponto é composto por 5 leituras que correspondem a: velocidade do vento (na forma de suas componentes: u, v, e w); contra-torque no eixo do rotor (medido através do transdutor de torque); e rotação no eixo do rotor (medido pelo tacômetro). Cada ponto é formado pela média das leituras dos instrumentos no intervalo de 1 minuto, ou seja, o Data Logger recebe a leitura de cada um dos instrumentos a cada 1s e a intervalos de 1min. processa a média dessas leituras e armazena este valor, que é apresentado na forma de tensão e corrente.

Ao iniciar o processo de coleta dos dados foi preciso fazer a configuração do sistema de aquisição, que consistiu em programar o Data Logger para receber de cada canal dos conversores a leitura correspondente à grandeza física medida. O Data Logger foi programado conforme a configuração proposta pela concepção do sistema de aquisição de dados indicado na Tabela 8. A Figura 22 mostra o passo a passo da programação do Data Logger feita através do programa ENVIROMON.

Figura 22 - Programação do Data Logger

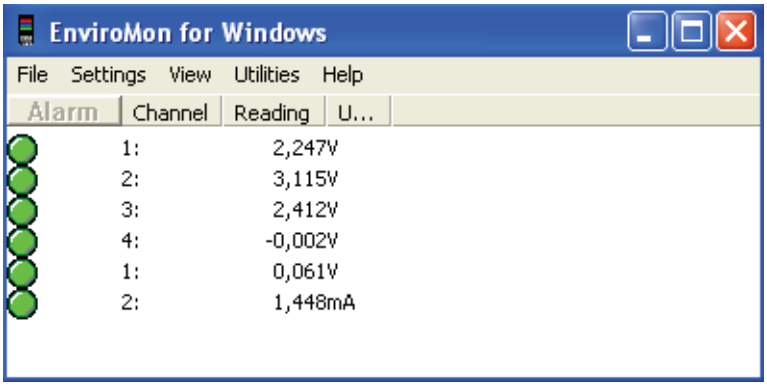




Fonte: Imagem retirada do programa EnviroMon

A leitura de cada instrumentos pôde ser acompanhada através da visualização instantânea em cada canal, ilustrada pela Figura 23, ou por uma visualização ponto a ponto, ilustrada pela Figura 24. Para posterior análise dos dados coletados, o programa ENVIROMON dispõe de uma ferramenta que permite que estes dados sejam exportados para uma planilha eletrônica.

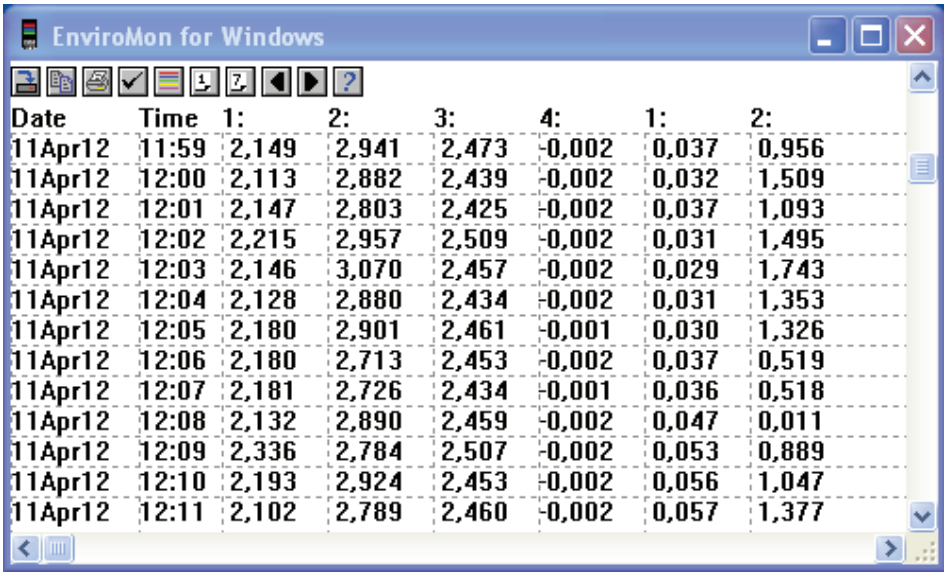
Figura 23 - Visualização instantânea das leituras do Data Logger



Fonte: Imagem retirada do programa EnviroMon

Os testes experimentais foram realizados variando-se o ângulo de pitch (β) das pás no protótipo experimental. Primeiramente foi ensaiado o ângulo β=27,1° que corresponde ao ângulo de projeto da pá (Δβ=0°); e a seguir o ângulo de 30,1° que corresponde a um acréscimo de +3° (Δβ=+3°) ao ângulo de projeto. A escolha de uma variação de 3° ao ângulo de projeto da pá foi baseada na teoria da performance de aerogeradores.

Figura 24 - Visualização ponto a ponto das leituras do Data Logger



EnviroMon for Windows

Date	Time	1:	2:	3:	4:	1:	2:
11Apr12	11:59	2,149	2,941	2,473	-0,002	0,037	0,956
11Apr12	12:00	2,113	2,882	2,439	-0,002	0,032	1,509
11Apr12	12:01	2,147	2,803	2,425	-0,002	0,037	1,093
11Apr12	12:02	2,215	2,957	2,509	-0,002	0,031	1,495
11Apr12	12:03	2,146	3,070	2,457	-0,002	0,029	1,743
11Apr12	12:04	2,128	2,880	2,434	-0,002	0,031	1,353
11Apr12	12:05	2,180	2,901	2,461	-0,001	0,030	1,326
11Apr12	12:06	2,180	2,713	2,453	-0,002	0,037	0,519
11Apr12	12:07	2,181	2,726	2,434	-0,001	0,036	0,518
11Apr12	12:08	2,132	2,890	2,459	-0,002	0,047	0,011
11Apr12	12:09	2,336	2,784	2,507	-0,002	0,053	0,889
11Apr12	12:10	2,193	2,924	2,453	-0,002	0,056	1,047
11Apr12	12:11	2,102	2,789	2,460	-0,002	0,057	1,377

Fonte: Imagem retirada do programa EnviroMon

O ângulo de pitch (β) de uma pá é um parâmetro geométrico que afeta diretamente a potência de saída do aerogerador (SINGH & AHMED, 2013). Burton et al. (2001, p. 181) demonstra a variação da potência de saída de um aerogerador quando o ângulo de pitch (β) é incrementado e/ou decrementado 2°. Neste trabalho determinou-se uma variação a cada 3º em função das dificuldades práticas encontradas na montagem das pás no protótipo experimental. Uma variação de 2º no ângulo de pitch (β) das pás mostrou-se muito imprecisa numa primeira tentativa, e por isso adotou-se então o valor $\Delta\beta=\pm 3°$.

Apenas dois ângulos puderam ser testados devido a problemas ocorridos durante o ensaio que vieram a danificar as pás de teste. Mais variações (acréscimos e decréscimos) no ângulo de pitch (β) das pás poderão ser testadas em futuros trabalhos.

Para uma boa coleta de dados foi necessário varrer uma gama de velocidades específicas (λ), variando desta forma o λ de operação do protótipo. Para isso, variou-se a posição da manivela de acionamento do freio, prendendo ou soltando o conjunto de pás de forma que, sob determinadas condições de vento, este operasse com maior ou menor velocidade. A Figura 25 ilustra o acionamento do freio mecânico durante a operação do protótipo experimental.

Os dados coletados foram exportados para uma planilha eletrônica com objetivo de serem tratados para posterior análise. Tais planilhas são exemplificadas no Anexo B.

Figura 25 - Manivela de acionamento do freio mecânico

Fonte: Fotos tiradas no CEMA em 10 de abril de 2012

5.4.1 Conversão e Validação dos Dados Experimentais

Uma vez que o Data Logger fornece a leitura dos instrumentos em forma de tensão e de corrente, estes precisam ser convertidos para suas grandezas físicas equivalentes. Esta conversão foi feita para cada instrumento de acordo com sua curva de calibração.

Os pontos coletados nos testes de campo foram convertidos em suas unidades físicas correspondentes de acordo com a relação de conversão de cada instrumento de medição. A calibração dos instrumentos foi apresentada na seção 5.2.2.1.

Para a conversão dos dados coletados em suas grandezas físicas correspondentes as seguintes relações de conversão foram adotadas:

a) Velocidade do vento: para cada uma de suas componentes, conforme relação de conversão apresentada na Tabela **9**, dada pela equação (37);
b) Torquímetro: conforme calibração realizada por Azevedo (2011, p.31), dada pela equação (38);
c) Tacômetro: conforme calibração descrita no Anexo A, dada pela equação (39);

$$v_i\left[m/s\right] = 8 \times v_i\left[V\right] - 20 \tag{37}$$

$$Tor\left[Nm\right] = 40,441 \times Tor\left[V\right] + 1,3775 \tag{38}$$

$$Tac\left[rpm\right] = 123,92 \times Tac\left[mA\right] + 1,0234 \tag{39}$$

A validação dos pontos coletados numa primeira análise se deu excluindo-se aqueles cuja velocidade resultante do vento tenha sido inferior a $2\,m/s$, uma vez só há aproveitamento eólico a partir dessa velocidade.

Uma segunda análise é dedicada aos valores de coeficiente de potência (C_p). Valores de C_p que estavam acima do limite de Betz foram descartados. Uma vez que o limite de Betz é o valor da máxima de potência que qualquer turbina eólica poderá ser capaz de atingir, como afirmam Burton et al., (2001); Manwell et al., (2002); e Hau (2006), pontos obtidos no teste experimental que resultaram em valores de C_P acima de 0,593 devem ser interpretados como possíveis erros do experimento.

O terceiro e último critério de validação dos dados experimentais também está baseado nos valores de C_p, neste caso os dados coletados no ensaio experimental foram selecionados excluindo-se os pontos cujo coeficiente de potência (C_P) apresentasse valor superior a 0,47.

Tal critério de exclusão está baseado no fato de que segundo Burton (2001, p.173, nossa tradução) "[...] o valor máximo do C_P será de apenas 0,47, alcançado em uma relação de velocidade específica de ponta 7, que é um valor inferior ao limite de Betz. Essa discrepância é causada, neste caso, pelo arrasto e pelas perdas de ponta [...]".

Burton (2001, p.173) ainda afirma que mesmo que tais perdas não sejam consideradas, ainda assim o limite de Betz não será alcançado, visto que o projeto das pás não é perfeito. Pontos experimentais que resultam em valores de C_P superiores a 47% devem ser interpretados como possíveis picos ocasionados pela inércia do sistema.

Com os dados do ensaio experimental coletados, convertidos e validados, duas planilhas foram geradas: uma para o 0°, ou ângulo de projeto ($\beta = 27{,}1^{\circ}$), e outra para o $\Delta\beta$=+3°.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capitulo são apresentados os resultados obtidos nesta dissertação. Como parte fundamental do trabalho são apresentados os resultados do projeto da pá de raio $1,5m$, fabricada com perfil NREL S809, no qual são empregados os conceitos da aerodinâmica de aerogeradores, sob a forma de suas curvas de afilamento e torção. Resultam ainda deste trabalho os dados coletados nos testes de campo realizados no CEMA, no período de 04 a 12 abril de 2012. Na avaliação de desempenho do protótipo experimental os resultados são apresentados sob a forma de curva de desempenho ($C_P \times \lambda$) para ambos os modos de operação. A comparação estatística, baseada na estatística descritiva, apresenta um comparativo do desempenho em cada modo de operação para as faixas de velocidade específica (λ) avaliadas.

6.1 PROJETO DA PÁ

Uma vez que o projeto da pá é determinado por seus parâmetros geométricos, como mencionado na seção 5.1, determinar o afilamento e a distribuição do ângulo de pitch ao longo da pá é essencial. Portanto, pelo emprego das equações (34), (36), e (20) determinou-se a geometria da pá.

A Tabela 10 mostra a medida da corda (c) e o ângulo de pitch (β) em cada seção da pá.

Tabela 10 - Medidas de afilamento e pitch de uma pá construída com perfil NREL S809 e raio de $1,5m$.

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
Elem.	**μ**	**c (m)**	**β (º)**
2	0,10	0,438	27,1
3	0,15	0,374	21,7
4	0,20	0,315	17,0
5	0,25	0,268	13,4
6	0,30	0,231	10,7
7	0,35	0,203	8,6
8	0,40	0,180	6,9
9	0,45	0,162	5,6
10	0,50	0,147	4,5
11	0,55	0,135	3,6

PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
Elem.	**μ**	**c (m)**	**β (º)**
12	0,60	0,124	2,8
13	0,65	0,115	2,1
14	0,70	0,107	1,5
15	0,75	0,100	1,0
16	0,80	0,094	0,5
17	0,85	0,089	0,0
18	0,90	0,084	-0,6
19	0,95	0,080	-1,6
20	1,00	0,080	-1,6

Os Gráficos 2 e 3 trazem respectivamente as curvas de afilamento e de pitch para uma pá com raio de $1,5m$ construída com o perfil aerodinâmico NREL S809, que foi empregada no protótipo experimental deste trabalho.

Gráfico 1 - Curva de Afilamento da pá construída com perfil NREL S809

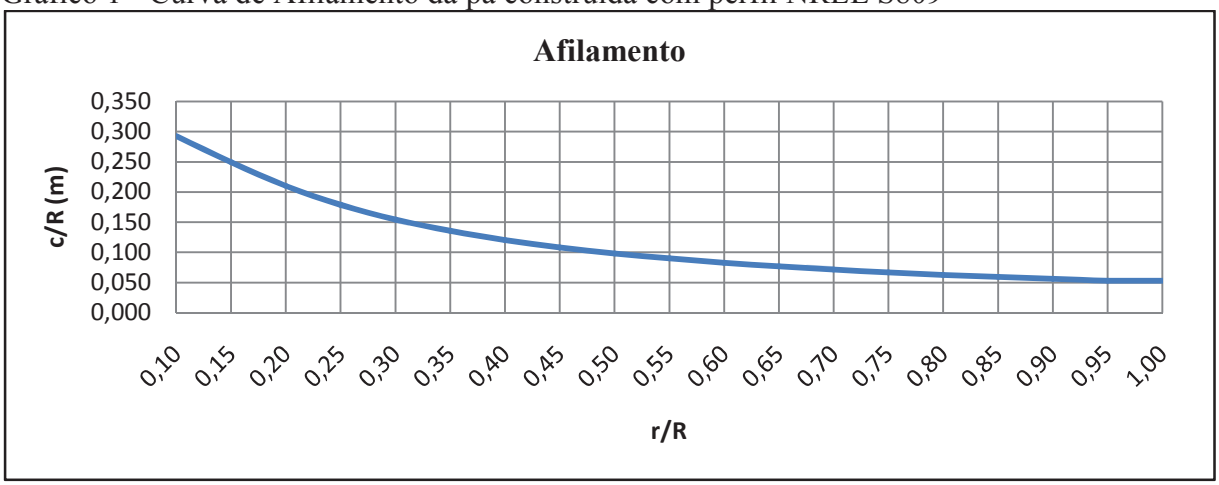
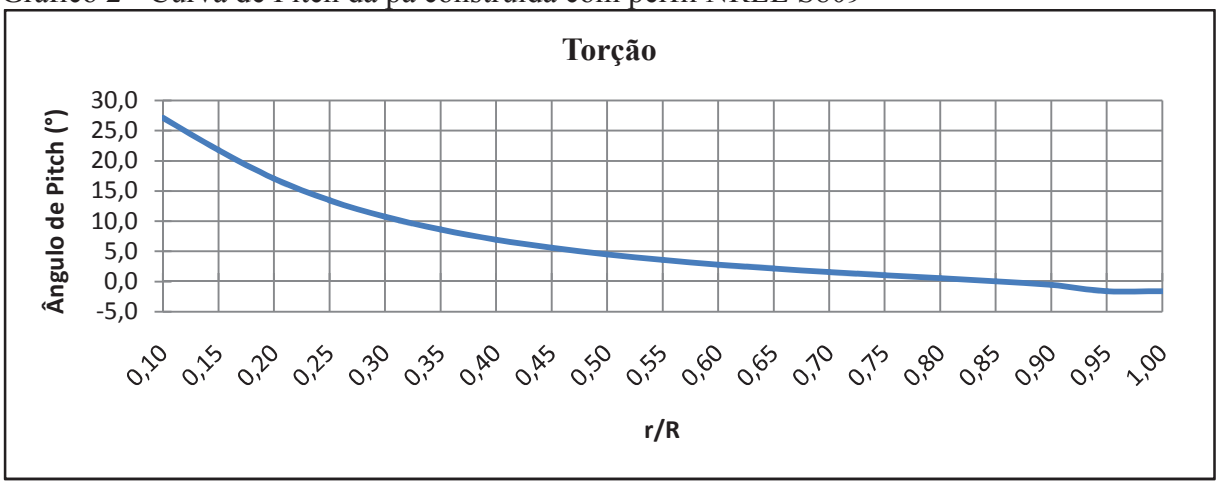


Gráfico 2 - Curva de Pitch da pá construída com perfil NREL S809



6.2. ENSAIO EXPERIMENTAL

Os testes experimentais foram realizados na área do CEMA no período de 04 a 12 de abril de 2012, para o ângulo 27,1° que corresponde ao ângulo de projeto da pá (Δβ=0°), e para o ângulo de 30,1° que corresponde ao acréscimo Δβ=+3° ao ângulo de projeto da pá.

Na coleta dos dados foram obtidos 780 pontos distribuídos conforme indicado na Tabela 11. Os pontos coletados são aqueles obtidos na operação do protótipo experimental, conforme descrito na seção 5.4.

Tabela 11 - Pontos coletado em teste experimental no CEMA

Data	**Ângulo da pá**	**N° de Pontos Coletados**	**Período da Coleta**
04/04/2012	Δβ=0°	148	14:40 as 17:07
09/04/2012	(27,1°)	163	14:24 as 17:06
11/04/2012	Δβ=+3°	428	08:24 as 16:31
12/04/2012	(30,1°)	41	08:50 as 09:30
	TOTAL:	780	

6.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

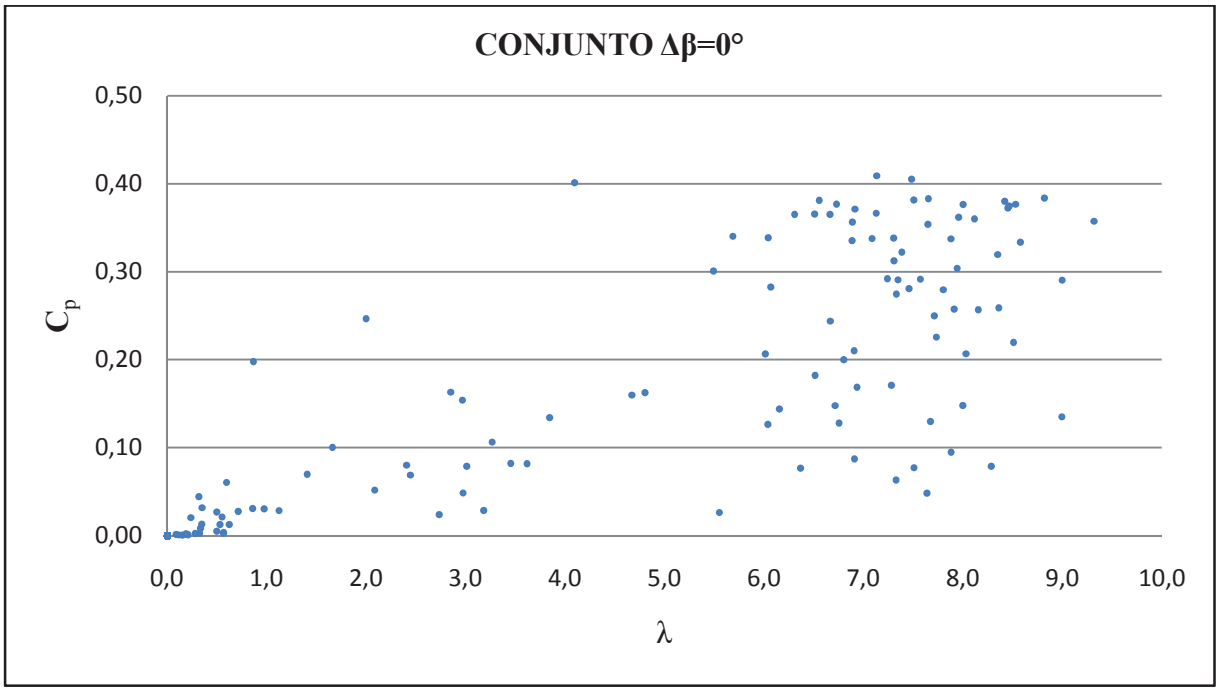
Para cada ponto coletado calcula-se a potência disponível no vento (P_∞), a potência mecânica conseguida pelo protótipo (P), a velocidade específica (λ), e finalmente o coeficiente de potência (C_P) do sistema, que é o parâmetro em estudo de interesse desta dissertação. Tais equações estão descritas nas seções 4.1.1 e 4.1.2.

Os dados experimentais foram validados com base nos valores do coeficiente de potência (C_P) de acordo com dois critérios: primeiramente excluindo-se os pontos cujo valores de C_P fossem superiores ao limite de Betz ($C_{pBetz} = 0,593$), em seguida excluindo-se os pontos cujos valores de C_P fossem superiores a 47% ($C_p \leq 0,47$). A conversão e a validação dos dados do teste de campo podem ser vistos na seção 5.4.1.

Como critério de denominação adotou-se que: os dados coletados na operação do protótipo com ângulo $\beta = 27,1º$ são chamados de conjunto Δβ=0°; enquanto os dados coletados na operação com ângulo $\beta = 30,1º$, são chamados de conjunto Δβ=+3°.

Para cada conjunto de dados é apresentado um gráfico de desempenho do aerogerador ($C_P \times \lambda$) na forma de dispersão de pontos. Estes gráficos dão uma noção geral da distribuição dos pontos experimentais, como valores de pico, pontos de concentração, e grau de dispersão.

Gráfico 3 - Eficiência do protótipo em operação $\beta = 27{,}1°$

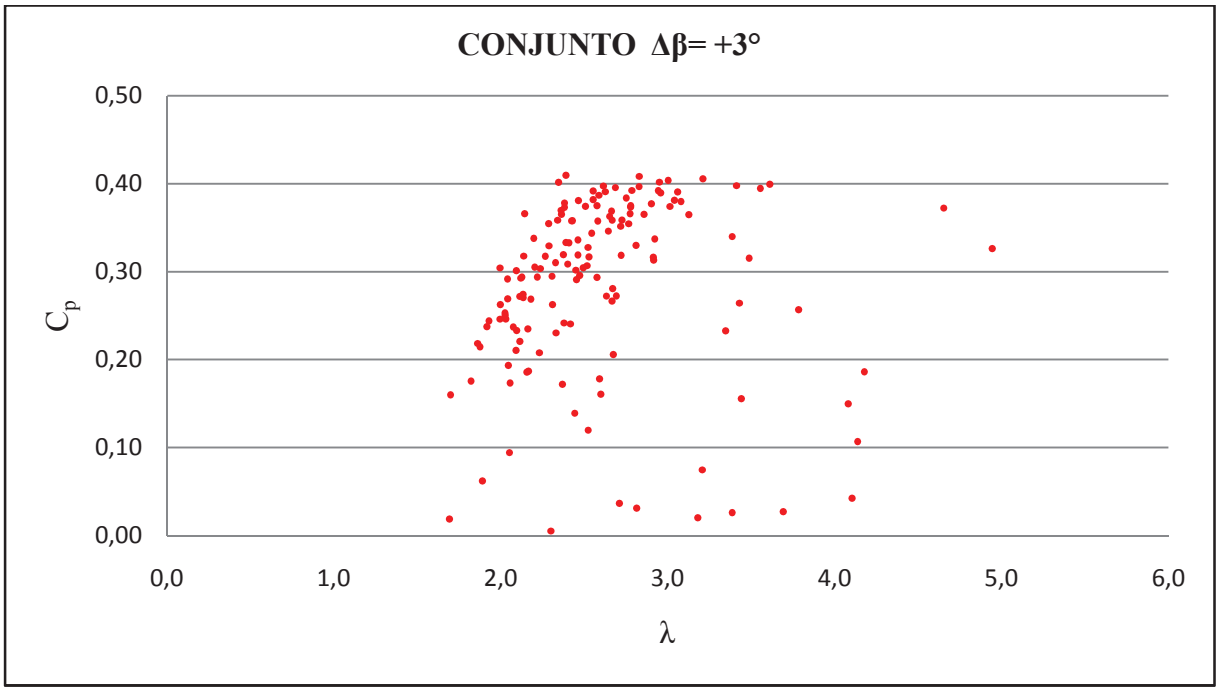


No Gráfico 3, observa-se que existem muitos pontos com baixa velocidade específica (λ), isso se deve ao fato de que durante os testes em campo o protótipo do aerogerador esteve na posição de rotação nula (ou seja, com o freio acionado) em vários momentos da coleta. Nota-se também que os melhores valores de coeficientes de potência (C_P) encontram-se nas velocidades específicas (λ) entre 6 e 9, intervalo que compreende o próprio λ de projeto, como era esperado. Conforme afirma Hau (2006, p. 121) um aerogerador do tipo tri-pá encontra seu ponto de máxima eficiência em valores de velocidade específica (λ) de projeto entre 7 e 8, como demonstra a Figura 7 na seção 5.1

No Gráfico 4 nota-se que há um número menor de pontos abaixas velocidades específica (λ), isso foi conseguido porque o protótipo ficou por menos tempo na posição de operação nula. A dispersão dos pontos coletados mostra neste caso, uma maior concentração de pontos entre as velocidades específica (λ) de 2 a 4, mostrando que os melhores coeficientes de potência, foram conseguidos a baixo do λ de projeto.

Um aerogerador de pequeno porte projetado com o perfil aerodinâmico NREL S809 tende a apresentar um bom desempenho mesmo a baixas velocidades específicas. Tal comportamento era esperado visto que o perfil NREL S809 foi desenvolvido especificamente para aerogeradores, que devem funcionar sem deslocamento da camada limite sob diversas condições de rotação e velocidade de vento (ROCHA et al., 2011). O perfil NREL S809 tem se mostrado adequado quando usado em aerogeradores que operam em locais com grandes variações na velocidade do vento.

Gráfico 4 - Eficiência do protótipo em operação $\beta = 30{,}1^{o}$



6.3.1 Análise Estatística

A análise estatística empregada nesta dissertação tem como base os conceitos da estatística descritiva descritos na seção 4.2.

A partir de uma análise comparativa avaliou-se o desempenho de um aerogerador de pequeno porte construído com perfil aerodinâmico NREL S809, em dois modos de operação: primeiramente operando em ângulo de projeto ($\beta = 27{,}1^{o}$), e a posteriore com o acréscimo de 3 graus ao ângulo de projeto das pás (Δβ=+3°).

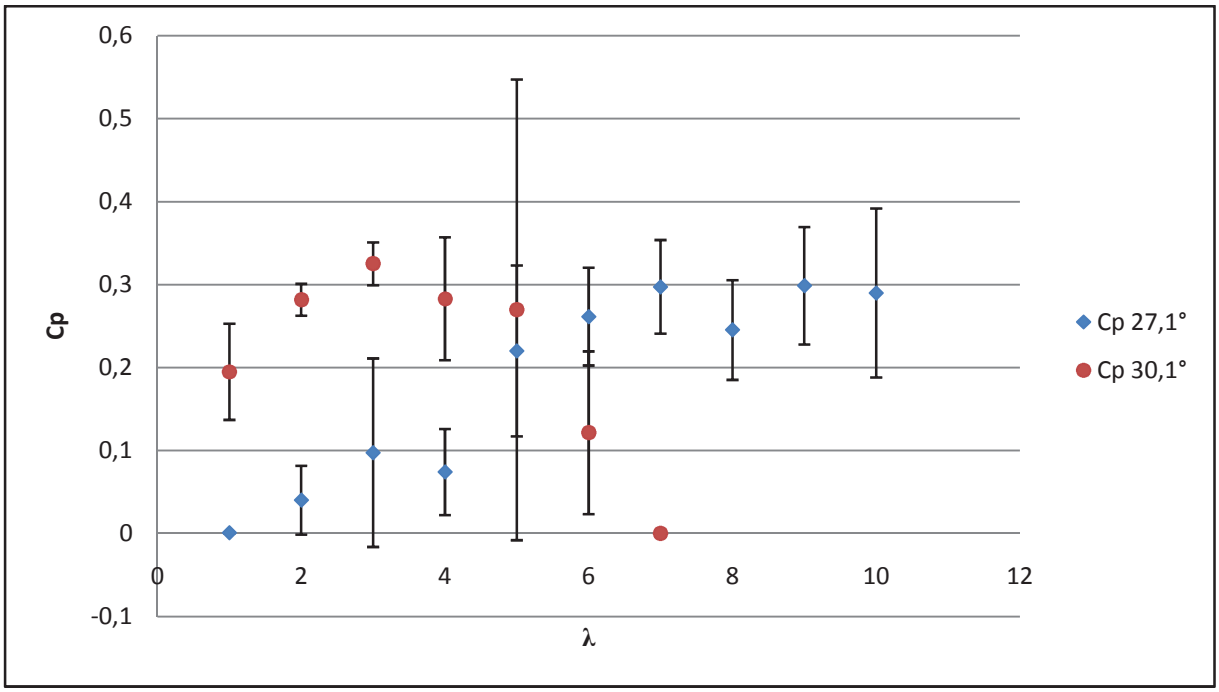
Estando os dados devidamente selecionados estes foram agrupando em dois conjuntos: o conjunto Δβ=0° e o conjunto Δβ=+3°. Para cada um desses conjuntos estabeleceu-se intervalos de velocidade específica (λ) de amplitude de $0{,}5$ e agrupou-se os

pontos contidos em cada um desses intervalos, calculando-se em para cada um deles a média, o desvio padrão, a distribuição t-Student e o Erro de cada parâmetro em análise: velocidade específica (λ), torque, potência, e coeficiente de potência (C_P).

Determinou-se assim, na forma de barras de erro, os intervalos de confiança de 95% de uma distribuição t-Student para cada faixa de velocidade específica (λ) em estudo.

O Gráfico 5 traz os coeficientes de potência (C_P) médio dos intervalos de velocidade específica (λ) de amplitude de $0,5$ para cada conjunto de dados com suas respectivas barras de erro. O erro foi determinado através de uma distribuição t-Student a 5% bicaudal.

Gráfico 5 - Coeficientes de Potência médios e suas barras de erro



6.3.1.1 Comparação de Desempenho

A comparação estatística do desempenho do protótipo experimental para operação em diferentes ângulos de pitch ($\beta = 27,1°$ e $\beta = 30,1°$) se deu em função da existência ou não de normalidade dos conjuntos de pontos coletados, agrupados por intervalos de velocidade específica (λ).

Primeiramente foi necessário verificar se os dados coletados no teste de campo representavam uma distribuição normal. Para isso precisou ser realizado um teste de normalidade, que consiste em analisar os valores de simetria e de curtose para cada amostra

(ALBIERO et al., 2012). Uma amostra corresponde a um conjunto de pontos experimentais de determinado modo de operação (ou seja, que operaram com ângulo $\beta = 27{,}1°$ ou $\beta = 30{,}1°$) agrupados por intervalos de velocidade específica (λ). Desta forma, para cada amostra, utilizando o programa Minitab15[3] determinou-se os seguintes parâmetros estatísticos: Número total da amostra (ou número de pontos experimentais), média, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, mínimo, máximo, simetria e curtose.

O coeficiente de potência (C_p) que é o parâmetro em estudo neste trabalho, está resumido pela Tabela 15, enquanto que os demais parâmetros (velocidade específica (λ), torque e potência mecânica) são mostrados pelas Tabelas 12, 13, e 14 respectivamente.

Tabela 12 - Parâmetros estatísticos das amostras para velocidade específica (λ)

Intervalo λ	Modo Operação	Nº Total da amostra	Média	Desvio Padrão	Variância	Coef. Variação	Mínimo	Máximo	Simetria	Curtose
0-1,0	$\beta = 27{,}1°$	25	0,4393	0,2448	0,0599	55,73	0,0900	0,9735	0,56	-0,45
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
1,0-2,0	$\beta = 27{,}1°$	4	1,547	0,372	0,139	24,06	1,124	1,999	0,19	-0,62
	$\beta = 30{,}1°$	11	1,8779	0,1078	0,0116	5,74	1,6909	1,9963	-0,74	-0,28
2,0-3,0	$\beta = 27{,}1°$	7	2,637	0,335	0,112	12,70	2,085	2,974	-0,64	-0,80
	$\beta = 30{,}1°$	109	2,4529	0,2633	0,0693	10,73	2,0237	2,9561	0,08	-1,02
3,0-4,0	$\beta = 27{,}1°$	6	3,396	0,304	0,093	8,96	3,012	3,844	0,35	-0,79
	$\beta = 30{,}1°$	20	3,3213	0,2348	0,0551	7,07	3,0016	3,7825	0,28	-0,89
4,0-6,0	$\beta = 27{,}1°$	6	5,050	0,627	0,394	12,43	4,095	5,686	-0,57	-1,19
	$\beta = 30{,}1°$	6	4,349	0,361	0,130	8,31	4,080	4,943	1,20	-0,29
6,0-7,0	$\beta = 27{,}1°$	22	6,5610	0,3268	0,1068	4,98	6,0142	6,9353	-0,56	-1,14
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
7,0-8,0	$\beta = 27{,}1°$	29	7,5459	0,2722	0,0741	3,61	7,0865	7,9984	0,06	-1,12
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
8,0-10,0	$\beta = 27{,}1°$	17	8,4931	0,3626	0,1315	4,27	8,0021	9,3182	0,79	0,26
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*

[3] Utilizou-se a versão Minitab15 através de uma licença de teste para uso acadêmico pelo período de 30 dias. O programa foi disponibilizado no site www.minitab.com/pt-Br/products/minitab/free-trial

Tabela 13 - Parâmetros estatísticos das amostras para torque

Intervalo λ	Modo Operação	Nº Total da amostra	Média	Desvio Padrão	Variância	Coef. Variação	Mínimo	Máximo	Simetria	Curtose
0-1,0	$\beta = 27{,}1°$	25	2,526	1,110	1,231	43,93	1,337	4,330	0,05	-1,76
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
1,0-2,0	$\beta = 27{,}1°$	4	3,460	0,210	0,044	6,07	3,238	3,723	0,46	-0,95
	$\beta = 30{,}1°$	11	19,72	7,91	62,54	40,10	2,62	26,28	-1,65	1,64
2,0-3,0	$\beta = 27{,}1°$	7	2,394	0,698	0,487	29,15	1,377	3,116	-1,01	-0,88
	$\beta = 30{,}1°$	109	17,308	4,910	24,111	28,37	0,471	27,398	-1,05	1,82
3,0-4,0	$\beta = 27{,}1°$	6	2,483	0,697	0,486	28,07	1,377	3,238	-0,53	-0,05
	$\beta = 30{,}1°$	20	8,45	5,45	29,69	64,47	0,51	17,03	-0,11	-1,38
4,0-6,0	$\beta = 27{,}1°$	6	2,746	0,901	0,811	32,81	1,014	3,480	-1,85	3,80
	$\beta = 30{,}1°$	6	2,328	1,306	1,705	56,08	0,769	4,597	1,01	1,64
6,0-7,0	$\beta = 27{,}1°$	22	2,826	0,756	0,571	26,74	1,216	3,683	-1,01	-0,15
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
7,0-8,0	$\beta = 27{,}1°$	29	2,891	0,753	0,567	26,05	1,377	3,602	-1,40	0,35
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
8,0-10,0	$\beta = 27{,}1°$	17	3,090	0,667	0,445	21,58	1,377	3,642	-2,17	4,05
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabela 14 - Parâmetros estatísticos das amostras para potência mecânica

Intervalo λ	Modo Operação	Nº Total da amostra	Média	Desvio Padrão	Variância	Coef. Variação	Mínimo	Máximo	Simetria	Curtose
0-1,0	$\beta = 27{,}1°$	25	2,840	2,029	4,117	71,44	0,575	8,351	1,25	1,32
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
1,0-2,0	$\beta = 27{,}1°$	4	11,019	1,254	1,572	11,38	9,296	12,043	-1,18	0,51
	$\beta = 30{,}1°$	11	138,3	57,2	3276,2	41,38	18,0	196,8	-1,42	1,27
2,0-3,0	$\beta = 27{,}1°$	7	14,97	3,04	9,22	20,28	9,98	19,30	-0,32	0,19
	$\beta = 30{,}1°$	109	133,63	41,52	1723,59	31,07	4,11	225,74	-0,66	0,91
3,0-4,0	$\beta = 27{,}1°$	6	22,94	7,44	55,34	32,43	14,34	33,95	0,31	-0,80
	$\beta = 30{,}1°$	20	73,9	51,4	2637,2	69,52	4,1	159,4	0,04	-1,48
4,0-6,0	$\beta = 27{,}1°$	6	29,93	7,30	53,31	24,40	21,80	41,25	0,45	-0,33
	$\beta = 30{,}1°$	6	20,34	12,66	160,37	62,28	7,20	43,03	1,29	1,93
6,0-7,0	$\beta = 27{,}1°$	22	43,65	11,80	139,22	27,03	20,64	61,31	-0,38	-0,57
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
7,0-8,0	$\beta = 27{,}1°$	29	53,52	13,03	169,77	24,34	25,23	81,13	-0,47	-0,18
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
8,0-10,0	$\beta = 27{,}1°$	17	65,83	12,79	163,53	19,43	32,89	78,75	-1,8	3,13
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*

Tabela 15 - Parâmetros estatísticos das amostras para o coeficiente de potência (C_p)

Intervalo λ	Modo Operação	Nº Total da amostra	Média	Desvio Padrão	Variância	Coef. Variação	Mínimo	Máximo	Simetria	Curtose
0-1,0	$\beta = 27{,}1°$	25	0,02260	0,03975	0,00158	175,92	0,00084	0,19786	3,86	16,90
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
1,0-2,0	$\beta = 27{,}1°$	4	0,1114	0,0949	0,0090	85,21	0,0286	0,2467	1,43	2,34
	$\beta = 30{,}1°$	11	0,1950	0,0863	0,0074	44,27	0,0190	0,3042	-1,12	0,63
2,0-3,0	$\beta = 27{,}1°$	7	0,0844	0,0537	0,0029	63,59	0,0240	0,1632	0,79	-1,01
	$\beta = 30{,}1°$	109	0,30075	0,08398	0,00705	27,92	0,00528	0,40947	-1,29	1,84
3,0-4,0	$\beta = 27{,}1°$	6	0,0854	0,0349	0,0012	40,83	0,0288	0,1341	-0,40	1,36
	$\beta = 30{,}1°$	20	0,2803	0,1418	0,0201	50,58	0,0205	0,4055	-0,97	-0,61
4,0-6,0	$\beta = 27{,}1°$	6	0,2319	0,1396	0,0195	60,19	0,0264	0,4013	-0,32	-1,06
	$\beta = 30{,}1°$	6	0,1974	0,1278	0,0163	64,75	0,0427	0,3723	0,42	-1,38
6,0-7,0	$\beta = 27{,}1°$	22	0,2483	0,1071	0,0115	43,14	0,0767	0,3813	-0,09	-1,60
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
7,0-8,0	$\beta = 27{,}1°$	29	0,2686	0,1061	0,0113	39,50	0,0483	0,4091	-0,80	-0,41
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*
8,0-10,0	$\beta = 27{,}1°$	17	0,2989	0,0933	0,0087	31,19	0,0790	0,3838	-1,14	0,48
	$\beta = 30{,}1°$	0	*	*	*	*	*	*	*	*

Para os intervalos de velocidade específica (λ) 0-1,0, e 6,0-10,0 não há pontos experimentais válidos no modo de operação $\beta = 30{,}1°$, não sendo assim possível uma comparação estatística nesses intervalos. Conforme os critérios de validação descritos na seção 5.4.1 os pontos do ensaio experimental cujo valor do coeficiente de potência (C_p) tenha sido superior a 47% foram excluídos da análise de desempenho do aerogerador.

Para os intervalos de velocidade específica (λ) 4,0-5,0 e 5,0-6,0 foram agrupados com a finalidade de aumentar o número de pontos experimentais, e assim permitir uma comparação estatística.

Assim, a comparação estatística entre os modos de operação do protótipo experimental só pôde ser realizada para os intervalos de velocidade específica (λ): 1,0-2,0; 2,0-3,0; 3,0-4,0; e 4,0-6,0, e por isso o testes de normalidade das amostras limitaram-se a estes intervalos.

Valores negativos de simetria representam concentrações de pontos a montante da média, enquanto os valores positivos representam concentrações a jusante. Da mesma forma, valores positivos de curtose representam distribuições concentradas em torno da média, enquanto os valores negativos representam distribuições achatadas em relação à média.

De acordo com Montgomery et al. (2003), valores de simetria e de curtose maiores do que ±3 representam um grande desvio na distribuição normal da amostra, e nestes casos deve-se desconsiderar a hipótese de normalidade. Analisando os valores de simetria e de curtose (Tabela 15) dos intervalos de velocidade específica (λ) de 1,0-2,0, 2,0-3,0,

3,0-4,0, e 4,0-6,0, pôde-se então, conforme afirma Montgomery et al. (2003), considerar que tais amostras representam uma distribuição normal.

As amostras, ou conjuntos de dados, que seguem uma distribuição normal devem ser avaliados, segundo Montgomery et al. (2003), por uma ANOVA (análise de variância), que é um teste de hipóteses sobre diferença entre médias e utiliza a estatística F, que considera que os vários grupos de tratamentos constituem um grupo total, sendo que a variância da amostra total é particionada em: variância dentro do grupo total, e variância entre grupos.

O cálculo da estatística F das amostras é a comparação do seu resultado com um valor tabelado F_0, que é função da distribuição F e depende dos graus de liberdade, tanto do erro quanto da amostra. Na mesma análise obtém-se o valor da significância (p) que é um parâmetro capaz de definir com precisão a rejeição, ou não, do teste de hipóteses.

Desta forma, através de uma análise de variância de via simples, determinou-se o valor da estatística F e da significância (p) para cada intervalo de velocidade específica (λ) que seguia uma distribuição normal.

A Tabela 16 mostra os resultados da análise de variância, ou ANOVA, nos intervalos de velocidade específica (λ) de interesse.

Tabela 16 - Análise de Variância

ANOVA - Análise de Variância de via Simples						
Intervalo λ		**Grau de Liberdade**	**Soma dos Quadrados - SS -**	**Quadrados Médios - MS -**	**F**	**p**
1,0-2,0	Fator	1	0,02050	0,02050	2,63	0,129
	Erro	13	0,10150	0,00781		
	Total	14	0,12200			
2,0-3,0	Fator	1	0,30782	0,30782	45,05	0,000
	Erro	114	0,77904	0,00683		
	Total	115	1,08686			
3,0-4,0	Fator	1	0,1752	0,1752	10,84	0,003
	Erro	24	0,3879	0,0162		
	Total	25	0,5631			
4,0-6,0	Fator	1	0,0036	0,0036	0,20	0,665
	Erro	10	0,1791	0,0179		
	Total	11	0,1826			

De acordo com as afirmações de Montgomery et al. (2003), a rejeição da hipótese nula ocorrerá quando a Esperança da média quadrada entre grupos for maior do que a

Esperança da média quadrada dentro de cada grupo, assim sendo, a hipótese nula deverá ser rejeitada sempre que o nível de significância dela for menor ou igual ao nível de significância requerido (α').

Neste trabalho foi adotado um nível de confiabilidade de 95%, valor este estimado em função do conhecimento prévio observado em outros trabalhos, e desta forma a significância requerida (α') foi de 5%. Como hipótese nula assume-se que não haja diferença entre as médias.

A Tabela 17 mostra o resultado do teste de hipóteses para cada intervalo de velocidade específica (λ) de interesse.

Tabela 17 - Resultado da ANOVA

TESTE DE HIPÓTESE			
Intervalo λ	**F**	**p**	**Rejeição da Hipótese nula** $(p \leq 0,05)$
1,0-2,0	2,63	0,129	NÃO
2,0-3,0	45,05	0,000	SIM
3,0-4,0	10,84	0,003	SIM
4,0-6,0	0,20	0,665	NÃO

Nos intervalos de velocidade específica (λ) de 1,0-2,0 e 4,0-6,0, a análise de variância mostrou que não houve rejeição da hipótese nula, ou seja, nestes intervalos não houve diferenças estatisticamente significativas entre médias. Isto significa dizer que em ambos os modos de operação ($\beta = 27,1°$ ou $\beta = 30,1°$) o protótipo apresentou o mesmo comportamento. Nestas velocidades os aerogeradores giram muito lentamente, o que ocasiona efeito de estol nos perfis aerodinâmicos, equiparando seus desempenhos.

Nos intervalos de velocidade específica (λ) de 2,0-3,0 e 3,0-4,0, a análise de variância mostrou que há uma rejeição da hipótese nula, ou seja, nestes intervalos há diferenças estatisticamente significativas entre médias e por isso, deve-se fazer um teste de médias nestes casos.

Segundo Montgomery et al. (2003), o teste da Mínima Diferença Significativa - MDS- é um teste mais robusto para problemas de normalidade, desde que se tenha uma razão F significativa a 5%. O MDS compara todos os pares de médias com a hipótese nula usando a estatística t. Desta forma, o teste de MDS a 5% de significância foi executado através do

programa Minitab15 e a Tabela 18 mostra os resultados do teste para os intervalos de velocidade específica (λ) analisados.

Tabela 18 - Resultado do Teste de MDS

Intervalo λ	Nível	Nº da Amostra	Média	Desvio padrão	MDS a 95% de confiança		
					Limite Inferior	Limite Central	Limite Superior
2,0-3,0	$\beta = 27{,}1°$	7	0,0844	0,0537	0,15248	0,21633	0,28018
	$\beta = 30{,}1°$	109	0,30075	0,08398			
3,0-4,0	$\beta = 27{,}1°$	6	0,0854	0,0349	0,0727	0,1949	0,3170
	$\beta = 30{,}1°$	20	0,2803	0,1418			

O Minitab15 implementa o teste de MDS através do método "Fisher" calculando os intervalos de confiança em todos os pares de médias. Resultam do teste que para o par de médias cujo limite superior e limite inferior incluir o zero não será significativamente diferente entre si (MONTGOMERY et al., 2003, p. 481). Desta forma, analisando os resultados do teste de MDS na Tabela 18, observou-se que em ambos intervalos de velocidade específica (λ) os limites superiores e inferiores não incluem o zero e desta maneira, a rejeição da hipótese nula foi confirmada, reafirmando que existe uma diferença estatisticamente significativa entre as médias de C_P.

Do ponto de vista físico, essa diferença entre médias, significa que a variação no ângulo de pitch na operação do protótipo nesses intervalos de velocidade específica (λ) causa uma diferença no desempenho do aerogerador.

Pequenas mudanças no ajuste do angulo de pitch das pás afetam a potência de saída de um aerogerador. Variações positivas aumentam o ângulo de projeto da pá e consequentemente diminuem o ângulo de incidência. Por outro lado, variações negativas aumentam o ângulo de incidência e que pode causar uma condição de "stall". (BURTON et al., 2001, p. 180)

Como pode ser observado na Tabela 15, os valores do coeficiente de potência (C_P) para a operação do protótipo em Δβ=+3° nas velocidades específicas 2,0-3,0 e 3,0-4,0 mostrou ser superior aqueles valores conseguidos no ângulo de projeto (Δβ=0°).

O fato do coeficiente de potência (C_P) ser maior para a operação em modo $\beta = 30{,}1°$ a baixos valores de velocidade específica (λ), implica dizer que seria útil um mecanismo de controle de pitch para velocidades de vento e rotações mais baixas. Isso

ajudaria a captar energia em situações em que o aerogerador operando no ângulo de pitch de projeto não pode aproveitar.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho promoveu o estudou da influência da variação do ângulo de pitch no desempenho de um aerogerador de pequeno porte, projetado com perfil aerodinâmico NREL S809 segundo as teorias do BEM, utilizando uma análise comparativa baseada em conceitos da estatística descritiva.

Dados experimentais foram obtidos através de testes em campo, para os quais utilizou-se um protótipo de aerogerador e um sistema de aquisição de dados.

Dois modos de operação do protótipo foram testados variando-se o ângulo de pitch das pás em 3° a partir do ângulo de projeto.

Uma avaliação de desempenho para cada ângulo de pitch, foi apresentada em forma de gráficos de dispersão de pontos ($C_P \times \lambda$), que mostrou a distribuição dos pontos experimentais, bem como a tendência da curva de potência do aerogerador para ambos ângulos de pitch testados.

A comparação estatística do desempenho do aerogerador, a partir dos pontos experimentais validados, se deu em função da existência de normalidade nas amostras, e assim sendo, para os intervalos de velocidade específica (λ) de 1,0-2,0; 2,0-3,0; 3,0-4,0; e 4,0-6,0 aplicou-se um teste de hipóteses sobre diferença entre médias através da análise de variância.

A análise de variância mostrou que para os intervalos de velocidade específica (λ) de 1,0-2,0 e 4,0-6,0 não houve rejeição à hipótese nula e desta forma, conclui-se que:

1. Nestes intervalos de velocidade especifica não houve diferenças estatisticamente significativas entre as médias, isso significa que mesmo variando-se o ângulo de pitch não foram observadas diferenças no desempenho do aerogerador. Nestas velocidades os aerogeradores giram muito lentamente, o que ocasiona efeito de estol nos perfis aerodinâmicos, equiparando seus desempenhos.

A análise de variância para os intervalos de velocidade específica (λ) de 2,0-3,0 e 3,0-4,0, mostrou que houve uma rejeição da hipótese nula e como critério de confirmação um teste de médias foi executado. Foi adotado o teste da Mínima Diferença Significativa (MDS) a 5% de significância, que confirmou a rejeição da hipótese nula para estes intervalos, e assim concluiu-se que:

2. Nestes intervalos de velocidade especifica houve diferenças estatisticamente significante entre as médias, o que significa que a variação do ângulo de pitch nessas velocidades específicas causa uma diferença no desempenho do aerogerador. Tal diferença era prevista e está em acordo com as teorias estudadas.

A utilização de um mecanismo de controle de pitch para aerogeradores de pequeno porte pôde ser justificada pelo fato do coeficiente de potência (C_p) ter se mostrado ser superior quando o ângulo de pitch foi aumentado em 3°, mesmo a baixos valores de velocidade específica (λ). Desta observação pode concluir que:

3. Um mecanismo de controle de pitch para aerogeradores que operam à velocidades de vento e rotações mais baixas pode ser útil, uma vez que o aumento do ângulo de pitch das pás pode ajudar o aerogerador a captar energia em situações em que ele, operando em seu ângulo de projeto, não seria capaz de aproveitar.

Visto que neste trabalho, não foi possível obter pontos experimentais válidos em todos os intervalos de velocidade específica (λ) de operação do protótipo, outros testes de campo podem vir a ser feitos com o objetivo de analisar o desempenho do protótipo em intervalos de velocidade específica (λ) que aqui não foram abrangidos, bem como em outras variações do ângulo de pitch.

Conclui-se que a proposta estabelecida para este trabalho foi alcançada e que os dados experimentais oriundos deste poderão ser utilizados como base para futuras pesquisas, aprimorado as análises e os resultados aqui obtidos.

REFERÊNCIAS

ALBIERO, D.; MACIEL, A. J. S.; MILAN, M.; MONTEIRO, L. A.; MION, R. L.; Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista científica agronômica**, v.43, n. 1, p. 86-95, jan-mar, 2012.

ALVAREZ, A. C. C.; ROCHA, P. A. C.; CARNEIRO, F. O. M.; Projeto Aerodinâmico de um Gerador Eólico Tripá para Ventos de Baixa Intensidade, Utilizando a Teoria do Momento de Elemento de Pá. *In:* CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5., 2008, Salvador. V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2008.

AZEVEDO, Danilo César Rodriguez. **Elaboração, Montagem, Calibração e Teste de um sistema de aquisição de dados para teste de campo de aerodores de pequeno porte.** 2011. 39f. Monografia (Graduação) - Depto. de Engenharia Mecânica e de Produção, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI, Ervin. **Wind Energy Handbook**. 1.ed. England. John Wiley & Sons, 2001. 608p.

CAMBLONG, H.; Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds. **Control Engineering Practice**. Bidart, v. 16, p. 946-958, 2008. Disponível em: www.science direct.com.

CASTRO, C. Diversificação da matriz: o futuro das energias alternativas e renováveis no Brasil. **Renergy Brasil.** Fortaleza, p. 48-56, jul./ago. 2010.

CARNEIRO, F. O. M.; LOPES, A. S.; ROCHA, P. A. C.; FONSECA, M. R.; Método de Fabricação de Pás de Aerogeradores de Pequeno Porte. *In:* CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 7., 2012, São Luiz. VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2012.

FREITAS, Kleison. **Notas de Aula de Probabilidade e Estatística**. 2011. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

HABALI, S. M.; SALEH, I. A.; Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades. **Renewable Energy,** Amman, v. 6, n. 2, p. 161-169, 1995. Disponível em: www.elsevier.com.

HAU, Erich. **Wind Turbines:** Fundamental, Technologies, Application, Economics**.** 2.ed. Germany. Springer, 2006. 750p.

JAUCHA, C.; ISLAMB, S. M.; SORENSENA, P.; JENSENC. B.B.; Design of a wind turbine pitch angle controller for power system stabilization. **Renewable Energy**, Perth, v. 32, p. 2334-2349, 2007. Disponível em: www.science direct.com

KASMI, A. E.; MASSON, C.; An extended κ-ε model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Montreal**,** v**.** 96, p. 103-122, 2008. Disponível em: www.elsevier.com.

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.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G., ROGERS, A. I. **Wind Energy Explained:** Theory, Design e Application. 1.ed. USA. John Wiley & Sons, 2002. 567p.

Meet Minitab15 for Windows. Minitab Inc. 2007. USA. Disponível em: www.minitab.com. Acessado em 27/08/2012.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3. ed. USA. John Wiley & Sons, 2003. 702p.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY **NREL: design and experimental results for the S809 airfoil.** Colorado, 1997. 97p.

OLIVEIRA, N. A capacidade instalada de energia eólica no Brasil em 2015. **Da Agência Nacional**. Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <http://www.advivo.com.br/blog/luisnassif>. Acessado em: 31/08/2012.

ROCHA, P. A. C.; CARNEIRO, F. O. M.; LOPES, A. S. ; MAIA, I. A. ; MODOLO, A. B.; Montagem e testes de uma bancada para medição de desempenho de aerogeradores em escala. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, (Impresso), v. 32, p. 2309, 2011.

ROCHA, P. A. C.; SOUZA. R. C.; ANDRADE. C. F.; SILVA. M. E. V.; Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil. **Applied Energy**, v. 89, p. 395-400, 2012.

ROSEN, A.; SHEINMAN, Y.; The average output power of a wind turbine in a turbulent wind, **Journal of wind energy and industrial aerodynamics,** Haifa, v. 51, p. 287-302, 1994. Disponível em: www.elsevier.com.

SENJYU, T.; SAKAMOTO, R.; URASAKI, N.; FUNABASHI, T.; FUJITA, H.; SEKINE, H.; Output Power Leveling of Wind Turbine Generators Using Pitch Angle Control for All Operating Regions in Wind Farm. **Electrical Engineering in Japan**, Japão, v. 158, n. 4, 2007. Traduzido por RONBUNSHI, D. G.; v. 125-B, n. 12, p. 1159–1168, 2005. Disponível em: www.elsevier.com

SILVA, Ermes Medeiros da; et al. **Estatística para os cursos de:** Economia, Administração e Ciências Contábeis. Vol. 1. 3.ed. São Paulo. Editora Atlas S.A., 1999. 188p

SINGH, R. K.; AHMED, M. R.; Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. **Renewable Energy**, Fiji, v. 50, p. 812-819, 2013. Disponível em: www.elsevier.com.

THUMTHAE, C.; CHITSOMBOON, T.; Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine. **Renewable Energy,** Thailand, **v.** 34, p. 1279-1284, 2009. Disponível em: www.elsevier.com.

WRIGHT, A.K.; WOOD, D.H.; The starting and low wind speed behaviour of a small horizontal axis wind turbine. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Allaghan, v. 92, p. 1265-1279, 2004. Disponível em: www.elsevier.com.

YILMAZ, A. S.; ÖZER, Z.; Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural networks. **Expert Systems with Applications,** Kahramanmaras, v. 36, p. 9767-9775, 2009. Disponível em: www.elsevier.com

ANEXOS

ANEXO A - Calibração do Tacômetro

A calibração do tacômetro foi realizada no Laboratório de Vibrações do Departamento de Engenharia Mecânica da UFC.

Para este procedimento montou-se em bancada um conjunto de testes composto de: motor e seu sistema de alimentação, sistema de aquisição de dados, sensor indutivo, tacômetro, computador e pistola estroboscópica.

Ao eixo do motor foi acoplada uma haste metálica e próximo a ela posicionado o sensor indutivo, de forma que a cada rotação do eixo um pulso magnético fosse gerado fornecendo ao tacômetro o número de rotação do motor. Ao conjunto foi ligado o sistema de aquisição de dados para que fossem obtidas as leituras no tacômetro e seu valor correspondente em forma de corrente (mA) lidos através do programa ENVIROMON.

Tabela 19 - Calibração do Tacômetro

TESTE DE CALIBRAÇÃO DO TACÔMETRO

DATA: 12/03/2012

Local: Laboratório de Vibrações - Departamento de Engenharia Mecânica

Modelo do Instrumento: TADIG

Modelo do Sensor: PS4-12GI50-E2

Especificação do Motor: TC 5050

Especificação da Pistola: DT-2239A

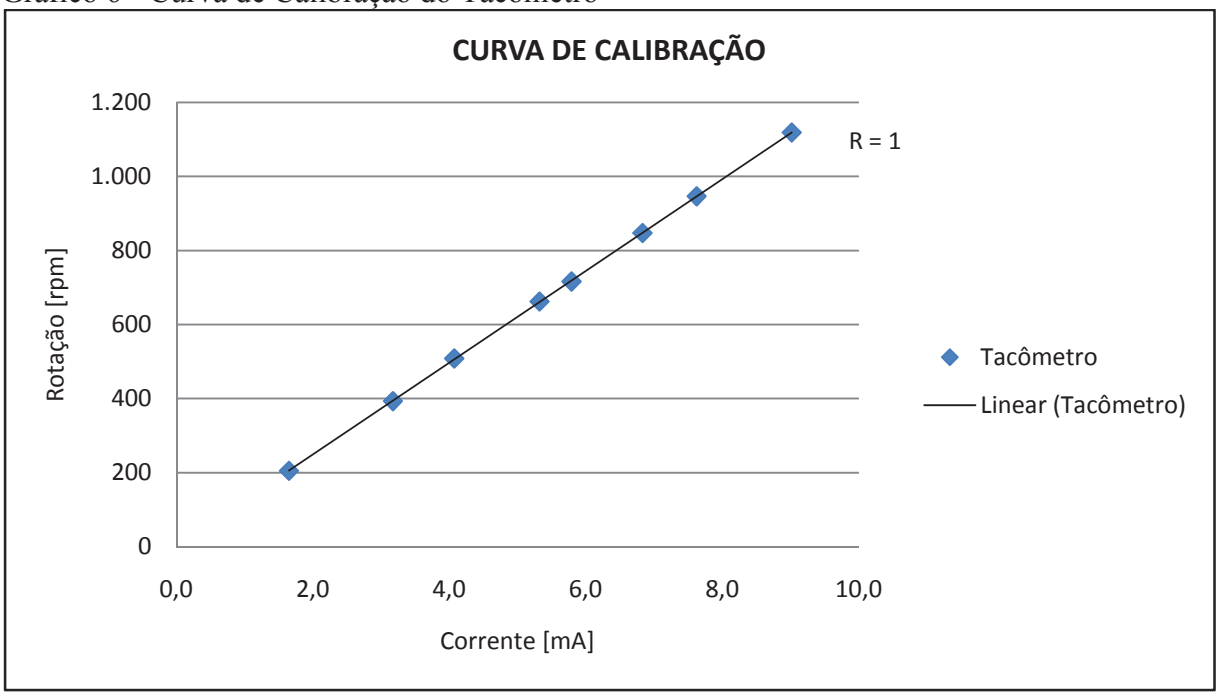
Medida	Horário da Medida			Corrente (mA)	Tacômetro (rpm)	Pistola (rpm)	Erro (%)
1				0,009	0	0	-
2	16:28	-	16:30	0,085	105	105,4	0,38%
3	16:23	-	16:25	1,650	205	203,7	0,63%
4	16:18	-	16:20	3,173	393	393,2	0,05%
5	16:12	-	16:14	4,071	508	504,0	0,79%
6	15:29	-	15:31	5,320	662	661,2	0,12%
7	15:38	-	15:40	5,790	716	717,7	0,24%
8	15:54	-	15:56	6,829	847	847,2	0,02%
9	16:01	-	16:03	7,623	946	944,5	0,16%
10	16:06	-	16:08	9,015	1118	1118,0	0,00%

Com o motor girando em freqüências pré-determinadas, posicionou-se a pistola estroboscópica em frente ao eixo do rotor, ajustando-a por meio dos botões de ajuste e de ajuste fino, até ter a percepção de que a haste acoplada ao eixo está fixa, ou seja, não mais girando. Nesta condição sabe-se que a rotação do motor é a mesma daquela indicada na pistola estroboscópica. Dessa forma, obtém-se uma tabela com os valores medidos em cada frequência ajustada no motor. A Tabela 19 mostra os resultados da calibração do instrumento.

De posse destes dados uma curva de calibração pôde ser gerada, conforme mostra o Gráfico 6, e a relação de conversão é determinada na equação (39).

$$Tac[rpm] = 123,92 \times Tac[mA] + 1,0234 \tag{39}$$

Gráfico 6 - Curva de Calibração do Tacômetro



ANEXO A - Planilhas Eletrônicas dos dados coletados no teste de campo

Figura 26 - Dados coletados exportados para planilha eletrônica

	A	B	C	D	E	F	G	H
2	Date	Time	01:00	02:00	03:00	04:00	01:00	02:00
144	04Apr12	14:40	2,266	2,906	2,48	0	0,043	0,006
145	04Apr12	14:41	2,347	2,74	2,498	-0,002	0,056	0,009
146	04Apr12	14:42	2,264	2,999	2,52	-0,002	0,034	0,008
147	04Apr12	14:43	2,134	2,836	2,447	-0,002	0,033	0,009
148	04Apr12	14:44	2,184	2,88	2,444	-0,002	0,042	0,009
149	04Apr12	14:45	2,259	2,938	2,469	-0,002	0,045	0,009
150	04Apr12	14:46	2,292	2,761	2,478	-0,002	0,057	0,009
151	04Apr12	14:47	2,293	2,867	2,474	-0,002	0,043	0,009
152	04Apr12	14:48	2,24	2,896	2,448	-0,002	0,042	0,009
153	04Apr12	14:49	2,318	2,915	2,512	-0,002	0,04	0,009
154	04Apr12	14:50	2,341	2,873	2,461	-0,002	0,051	0,009
155	04Apr12	14:51	2,254	2,898	2,459	-0,002	0,047	0,009
156	04Apr12	14:52	2,257	2,958	2,469	-0,002	0,039	0,009
157	04Apr12	14:53	2,319	3,041	2,518	-0,002	0,033	0,009
158	04Apr12	14:54	2,333	3,013	2,455	-0,002	0,044	0,009
159	04Apr12	14:55	2,396	3,037	2,483	-0,002	0,034	0,009
160	04Apr12	14:56	2,333	2,992	2,47	-0,002	0,041	0,009
161	04Apr12	14:57	2,266	3,093	2,483	-0,002	0,033	0,009
162	04Apr12	14:58	2,422	3,115	2,526	-0,002	0,028	0,009
163	04Apr12	14:59	2,308	2,943	2,477	-0,002	0,047	0,009
164	04Apr12	15:00	2,274	3	2,408	-0,002	0,043	0,009
165	04Apr12	15:01	2,271	2,963	2,451	-0,002	0,035	0,009
166	04Apr12	15:02	2,398	3,015	2,512	-0,002	0,035	0,009
167	04Apr12	15:03	2,377	2,985	2,471	-0,002	0,046	0,009

Fonte: Dados coletados no CEMA em 04 de abril de 2012.

Figura 27 - Dados coletados convertidos em suas unidades físicas correspondentes

	A	B	C	E	G	I	J	K	L	M	O	P	R	S
4				Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4		Vres		Canal 1		Canal 2	
5	Date	Time		U	V	W	Status				TOR		TAC	
6				(m/s)	(m/s)	(m/s)			(m/s)		(Nm)		(rpm)	(rad/s)
7	04Apr12	14:40		-1,872	3,248	-0,160	0,000		3,752		3,116		1,767	0,185
8	04Apr12	14:41		-1,224	1,920	-0,016	-0,002		2,277		3,642		2,139	0,224
9	04Apr12	14:42		-1,888	3,992	0,160	-0,002		4,419		2,752		2,015	0,211
10	04Apr12	14:43		-2,928	2,688	-0,424	-0,002		3,997		2,712		2,139	0,224
11	04Apr12	14:44		-2,528	3,040	-0,448	-0,002		3,979		3,076		2,139	0,224
12	04Apr12	14:45		-1,928	3,504	-0,248	-0,002		4,007		3,197		2,139	0,224
13	04Apr12	14:46		-1,664	2,088	-0,176	-0,002		2,676		3,683		2,139	0,224
14	04Apr12	14:47		-1,656	2,936	-0,208	-0,002		3,377		3,116		2,139	0,224
15	04Apr12	14:48		-2,080	3,168	-0,416	-0,002		3,813		3,076		2,139	0,224
16	04Apr12	14:49		-1,456	3,320	0,096	-0,002		3,627		2,995		2,139	0,224
17	04Apr12	14:50		-1,272	2,984	-0,312	-0,002		3,259		3,440		2,139	0,224
18	04Apr12	14:51		-1,968	3,184	-0,328	-0,002		3,757		3,278		2,139	0,224
19	04Apr12	14:52		-1,944	3,664	-0,248	-0,002		4,155		2,955		2,139	0,224
20	04Apr12	14:53		-1,448	4,328	0,144	-0,002		4,566		2,712		2,139	0,224
21	04Apr12	14:54		-1,336	4,104	-0,360	-0,002		4,331		3,157		2,139	0,224
22	04Apr12	14:55		-0,832	4,296	-0,136	-0,002		4,378		2,752		2,139	0,224
23	04Apr12	14:56		-1,336	3,936	-0,240	-0,002		4,163		3,036		2,139	0,224
24	04Apr12	14:57		-1,872	4,744	-0,136	-0,002		5,102		2,712		2,139	0,224
25	04Apr12	14:58		-0,624	4,920	0,208	-0,002		4,964		2,510		2,139	0,224
26	04Apr12	14:59		-1,536	3,544	-0,184	-0,002		3,867		3,278		2,139	0,224
27	04Apr12	15:00		-1,808	4,000	-0,736	-0,002		4,451		3,116		2,139	0,224
28	04Apr12	15:01		-1,832	3,704	-0,392	-0,002		4,151		2,793		2,139	0,224
29	04Apr12	15:02		-0,816	4,120	0,096	-0,002		4,201		2,793		2,139	0,224
30	04Apr12	15:03		-0,984	3,880	-0,232	-0,002		4,010		3,238		2,139	0,224

Fonte: Dados extraídos de tabela eletrônica com base em dados coletados no CEMA em 04 de abril de 2012.