

UNESP
FACULDADE DE ENGENHARIA DO CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

GUARATINGUETÁ
2012

GUSTAVO HENRIQUE ROSSETTI GEROTO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM AEROMOTOR DE EIXO VERTICAL

Dissertação apresentada à
Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual
Paulista, para obtenção do
título de Mestre em
Engenharia Mecânica na área
de Transmissão e Conversão
de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

Guaratinguetá

2012

G377a Geroto, Gustavo Henrique Rossetti
Avaliação do desempenho de um aeromotor de eixo vertical / Gustavo Henrique Rossetti Geroto – Guaratinguetá : [s.n], 2012.
104 f : il.
Bibliografia: f. 100-104

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

1. Energia eólica 2. Recursos energéticos I. Título

CDU 620.91(043)

GUSTAVO HENRIQUE ROSSETTI GEROTO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

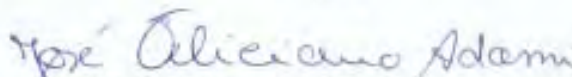


Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ FELICIANO ADAMI
Unesp-Feg



Prof. Dr. OSÍRIS CANCEGLIERI JÚNIOR
PUC/PR

DADOS CURRICULARES

GUSTAVO HENRIQUE ROSSETTI GEROTO

NASCIMENTO	Araras, 01 de setembro de 1975
FILIAÇÃO	Guilherme Geroto Márcia Aparecida Rossetti Geroto
1997/2000	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru da Universidade Estadual Paulista
2002/2004	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Especialização, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista
2010/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de vida! Devo a Ele a grande oportunidade de estar aqui.

A meus pais, Guilherme e Márcia, pela oportunidade de estudar e pelo suporte necessário. São grandes incentivadores de meus trabalhos, sempre me motivando a continuar.

A minha esposa Regina pela dedicação à família, sempre me auxiliando para que eu pudesse me dedicar aos estudos, e claro, pela compreensão pelo tempo dedicado a este trabalho e pelo incentivo constante. Não posso deixar de citar meu filho Eduardo, que apesar de ter apenas pouco mais de um ano de idade é fonte de alegria imensurável que me fortalece e me dá ânimo para não desistir.

Ao professor Dr. Teófilo, meu orientador, que sempre me apoiou e forneceu os caminhos e orientações necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.

A meus gestores da Embraer, em especial ao Ramón Roque, Carlos Naufel e Leonardo Amorim, por acreditarem em meu potencial e permitirem meu deslocamento até a universidade, sempre me apoiando e incentivando.

Aos amigos que de alguma forma me auxiliaram, incentivando, provendo idéias durante as conversas de corredor, e claro, em especial aos que tive oportunidade de cursar matérias do mestrado juntos, muitos dos quais dividindo as despesas da viagem.

Às funcionárias da Biblioteca e da Seção de Pós Graduação do Campus de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e vontade de ajudar.

GEROTO, G.H.R. **Avaliação do Desempenho de um Aeromotor de Eixo Vertical**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento, construção e avaliação de desempenho de um aeromotor de eixo vertical. Os ventos no local de instalação tiveram sua velocidade variando entre 1,4 m/s a 7 m/s. O modelo do aeromotor construído foi o Darrieus com três pás de perfil aerodinâmico constante. O rotor possui 3 m de diâmetro e a torre 6 m de altura. O perfil utilizado na construção das pás foi o NACA 0018-53, com bordo de ataque modificado. Este perfil apresenta o coeficiente de sustentação maior que o perfil padrão sem apresentar aumento significativo no coeficiente de arrasto. Foi adicionado um *slot* na parte traseira das pás visando baixar a velocidade de partida. A velocidade de partida média observada foi de 1,7 m/s. Com vento de 7 m/s o aeromotor desenvolveu 63 rpm no eixo. A potência máxima registrada foi de 82 W a 35 rpm sob a incidência de um vento de 4,6 m/s. Nesta condição, o coeficiente de potência máximo alcançado foi de 0,31 e a velocidade de ponta de pá (TSR) foi de 1,2. O equipamento se mostrou adequado ao local de instalação mesmo desenvolvendo baixos valores de potência final.

PALAVRAS CHAVE: Aeromotor de eixo vertical. Rotor H. Perfil aerodinâmico modificado. Energia eólica. Fonte renovável.

GEROTO, G.H.R. **Vertical Axis Wind Turbine Performance Evaluation**. 2012. 104 p. Dissertation (Master's degree of Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

This dissertation presents a vertical axis wind turbine development, construction and performance evaluation. At the installation site, the wind speed ranged from 1.4 m/s up to 7 m/s. A Darrieus type rotor with constant aerodynamic profile has been built with a three-blade rotor and 3 meters of diameter on a tower 6 m high. The NACA 0018-53 profile has been used with modified leading edge. This profile has increased lift coefficient in comparison to the standard profile and has not presented significant higher drag coefficient. It has been added a slot at the trailing edge of each blade aiming to drop down the start up wind speed. The average start up wind speed was 1.7 m/s. Under a wind speed of 7 m/s the wind turbine has developed 63 rpm. The maximum power measured was 82 W at 35 rpm with a wind speed of 4.6 m/s. At this condition, the power coefficient has reached 0.31 and the tip speed ratio (TSR) 1.2. The equipment proved to be suitable for the installation site even does not developing high power output.

KEY WORDS: Vertical axis wind turbine. H rotor. Modified aerodynamic profile. Eolic energy. Renewable source.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Aeromotor de eixo vertical com rotor H	20
FIGURA 2 - A: HAWT. B: VAWT	25
FIGURA 3 - Rotor Darrieus com pás de sustentação.....	25
FIGURA 4 - Componentes de um aerogerador. A: HAWT. B: VAWT	27
FIGURA 5 - Controle de velocidade através da variação do ângulo de ataque	28
FIGURA 6 - Aeromotor de eixo vertical Savonius	29
FIGURA 7 - Aeromotor de eixo vertical Darrieus.....	30
FIGURA 8 - Aeromotor de eixo vertical - Rotor H	31
FIGURA 9 - Princípio aerodinâmico das HAWT	36
FIGURA 10 - Princípio aerodinâmico das VAWT	37
FIGURA 11 - Curvas características de um aerogerador	38
FIGURA 12 - Tubo aerodinâmico imaginário sobre uma turbina eólica.....	41
FIGURA 13 - Perfil de velocidade e pressão do fluxo de ar no rotor de uma turbina eólica.....	42
FIGURA 14 - Coeficiente de potência pela velocidade de ponta de pá (TSR)	49
FIGURA 15 - Esteira aerodinâmica presente em um VAWT em movimento	50
FIGURA 16 - Velocidades de fluxo presente em um aeromotor de eixo vertical.....	52
FIGURA 17 - Diagrama de forças em uma pá de turbina de eixo vertical	53
FIGURA 18 - Diagrama de forças resultantes em uma pá de turbina de eixo vertical	56
FIGURA 19 - Local de instalação do aeromotor e presença de anteparos.....	62
FIGURA 20 - Velocidade média do vento em Guaratinguetá-SP de 1974-2000.....	63
FIGURA 21 - Comparativo dos coeficientes de sustentação (C_L) ($Re = 278266$)... 66	
FIGURA 22 - Comparativo dos coeficientes de arrasto (C_d) ($Re = 278266$).....	67
FIGURA 23 - Perfil NACA 0018-53 com slot traseiro.....	69
FIGURA 24 - Linha de fluxo no perfil NACA 0018-53 ($Re = 278266$).....	69
FIGURA 25 - Pá do aeromotor e slot traseiro.....	70
FIGURA 26 - Eixo de transmissão instalado na torre	71

FIGURA 27 - Eixo de transmissão: Mancal inferior e terminal de acoplamento.....	71
FIGURA 28 - Redutor de velocidades instalado no eixo do aeromotor.....	72
FIGURA 29 - Esquema do redutor de velocidades (relação: 6,25:1)	72
FIGURA 30 - Aeromotor de eixo vertical – Dimensões principais.....	74
FIGURA 31 - Aeromotor de eixo vertical – Vista geral	75
FIGURA 32 - Anemômetro digital.....	77
FIGURA 33 - Tacômetro digital	78
FIGURA 34 - Pontos de medição de rotações por minuto no eixo do aeromotor	79
FIGURA 35 - Termo-Higro-Anemômetro Barômetro digital	80
FIGURA 36 - RPM do eixo em vazio em relação à velocidade de vento incidente... 81	
FIGURA 37 - <i>TSR</i> em vazio em relação à velocidade de vento	84
FIGURA 38 - Velocidade mínima de partida do aeromotor	85
FIGURA 39 - Torquímetro	85
FIGURA 40 - Posicionamento do torquímetro no eixo do aeromotor	86
FIGURA 41 - Torque medido em relação ao RPM do eixo	87
FIGURA 42 - Torque calculado em relação ao RPM do eixo.....	92
FIGURA 43 - Comparativo das curvas de torque medido e calculado	92
FIGURA 44 - Comparativo das curvas de potência real e calculada.....	93
FIGURA 45 - Comparativo do coeficiente de potência medido e calculado	94
FIGURA 46 - Energia mensal em relação à velocidade de vento incidente	96

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Densidade do ar ao nível do mar.....	60
TABELA 2	Dados técnicos do anemômetro digital.....	78
TABELA 3	Dados técnicos do tacômetro digital	79
TABELA 4	Dados técnicos do termo-higro-anemômetro barômetro digital.....	80
TABELA 5	Amostragem das medições de velocidade do vento e rotação do eixo	81
TABELA 6	Dados técnicos do torquímetro	86
TABELA 7	Medições de RPM e torque do eixo	87
TABELA 8	Torque teórico disponível no eixo ($rpm = 21,5$; $V_{\infty} = 3,4$ m/s).....	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- FAA - Federal Aviation Administration
- HAWT - Turbina eólica de eixo horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine)
- ISA - International Standard Atmosphere
- NACA - National Advisory Committee for Aeronautics
- RPM - Rotações por minuto
- TSR - Velocidade de ponta de pá (Tip Speed Ratio)
- UNESP - Universidade Estadual Paulista
- VAWT - Turbina eólica de eixo vertical (Vertical Axis Wind Turbine)

LISTA DE SÍMBOLOS

Simbologia	Significado	Unidade
a	coeficiente de velocidade induzida	adimensional
A	área frontal de um tubo aerodinâmico	$[m^2]$
$A_{Superfície}$	área da superfície da pá	$[m^2]$
$A_{Varrida}$	área varrida	$[m^2]$
A_{Hor}	área varrida – aeromotores de eixo horizontal	$[m^2]$
A_{Vert}	área varrida – aeromotores de eixo vertical	$[m^2]$
B	número de pás do rotor	adimensional
c	corda da pá	$[m]$
C_d	coeficiente de arrasto	adimensional
C_L	coeficiente de sustentação	adimensional
C_n	coeficiente de força normal	adimensional
C_p	coeficiente de potência	adimensional
$C_{P_Hor_máx}$	coeficiente potência em aeromotores de eixo horizontal	adimensional
$C_{P_Vert_máx}$	coeficiente potência em aeromotores de eixo vertical	adimensional
C_t	coeficiente de força tangencial	adimensional
D_c	componente horizontal da força de arrasto	$[N]$
E_c	energia cinética do ar	$[kg.m^2 / s^2]$
f	Frequência	$[Hz]$
F	força	$[N]$
F_d	força de arrasto	$[N]$
F_L	força de sustentação	$[N]$
F_n	força normal da pás do aeromotor	$[N]$
F_t	força tangencial da pás do aeromotor	$[N]$
g	aceleração da gravidade	$[m / s^2]$
h	altura da pá	$[m]$

Simbologia	Significado	Unidade
m	massa de fluido	[kg]
l	largura	[m]
L	Comprimento	[m]
L_c	componente horizontal da força de sustentação	[N]
p_{atm}	pressão atmosférica	[Pa]
P^+	pressão no plano do rotor na tomada de ar	[Pa]
p^-	pressão no plano do rotor na saída de ar	[Pa]
p_1	pressão a montante do rotor	[Pa]
p_2	pressão a jusante do rotor	[Pa]
P	Potência	[W]
P_{conv}	potência convertida	[W]
P_w	potência disponível	[W]
\dot{Q}	Vazão	[kg / s]
R	raio do rotor	[m]
Re	número de Reynolds	adimensional
$R_{gás}$	constante dos gases perfeitos	[m ² / s ² K]
t	Tempo	[s]
T_0	temperatura do ar ambiente	[K]
T_t	torque total	[N.m]
Δt	variação de tempo	[s]
v	velocidade incidente no plano do rotor da turbina	[m/s]
v_{Linear}	velocidade linear da pá	[m/s]
v_1	velocidade do vento a montante do rotor	[m/s]
v_2	velocidade do vento a jusante do rotor	[m/s]
V_c	velocidade tangencial do rotor do aeromotor	[m/s]
V_n	velocidade normal do rotor do aeromotor	[m/s]
V_w	velocidade do fluxo de ar após passagem pela turbina	[m/s]

Simbologia	Significado	Unidade
V_{∞}	velocidade do fluxo de ar em fluxo livre	[m/s]
w	velocidade do vento aparente	[m/s]
W	Trabalho	[J]
z	altitude de instalação	[m]
α	ângulo de ataque das pás do rotor	[graus]
α'	ângulo de ataque complementar	[graus]
θ	ângulo de azimute	[graus]
ρ_0	densidade do ar ao nível do mar	[kg / m ³]
ρ	densidade do ar	[kg / m ³]
ω	velocidade angular do rotor	[rad/s]
λ	velocidade de ponta de pá	adimensional
∇	gradiente térmico	[K / m]
ν	viscosidade cinemática do ar	[m ² /s]
σ	solidicidade	adimensional

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Considerações iniciais.....	17
1.2 Importância.....	18
1.3 Justificativa.....	19
1.4 Delimitações do assunto e formulação de hipóteses.....	19
1.5 Objetivo da pesquisa.....	20
1.6 Estrutura da dissertação.....	20
2. ASPECTOS GERAIS SOBRE ENERGIA EÓLICA.....	23
2.1 Histórico.....	23
2.2 Aeromotores.....	24
2.2.1 Aspectos gerais e componentes.....	24
2.2.2 Evolução e desenvolvimento.....	28
2.2.3 Características dos aeromotores de eixo horizontal e de eixo vertical.....	31
2.2.3.1 Projeto e instalação.....	31
2.2.3.2 Aerodinâmica.....	33
2.2.3.3 Impacto ambiental.....	33
2.2.3.4 Custos.....	34
2.3 Aplicações dos aeromotores.....	35
3. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICO.....	36
3.1 Aspectos gerais sobre aerodinâmica das máquinas eólicas.....	36
3.1.1 Princípio de Funcionamento dos Aeromotores de Eixo Horizontal.....	36
3.1.2 Princípio de Funcionamento dos Aeromotores de Eixo Vertical.....	37
3.1.3 Curvas Típicas de Desempenho de Aeromotores.....	38
3.2 Potência e rendimento aerodinâmico das turbinas eólicas.....	39
3.2.1 Determinação da Potência.....	39
3.2.2 Determinação do Coeficiente de Potência.....	41
3.3 Fatores que influenciam o desempenho dos aeromotores.....	47
3.3.1 Número de Reynolds.....	47
3.3.2 Velocidade de ponta de pá.....	48

3.3.3 Solidicidade	49
3.3.4 Área Varrida	50
3.3.5 Torque	51
3.3.5.1 Ângulo de ataque	51
3.3.5.2 Variação da velocidade relativa do vento	53
3.3.5.3 Variação das forças normais e tangenciais	54
3.3.5.4 Força de Sustentação	55
3.3.5.5 Força de Arrasto	56
3.3.5.6 Cálculo do Torque	56
3.3.6 Modificação do perfil aerodinâmico das pás	58
3.3.7 Variação da densidade do ar com a altitude	59
3.3.8 Temperatura do ar	59
3.3.9 Umidade do ar	60
4. PROJETO DO AEROMOTOR DE EIXO VERTICAL	61
4.1 Objetivos gerais do projeto	61
4.2 Estratégias gerais do projeto	61
4.3 Local de instalação	61
4.4 Características físicas do local de instalação	61
4.5 O vento no local de instalação	62
4.6 Definição da orientação do eixo do aeromotor	63
4.7 Definição do tipo e número de pás do rotor	64
4.7.1 Definição do perfil aerodinâmico das pás	65
4.7.2 Determinação das dimensões das pás	67
4.7.3 Determinação das dimensões do slot	68
4.8 Eixo de transmissão	70
4.9 Redutor de velocidades	71
4.10 Descrição e dimensões finais do aeromotor	73
4.10.1 Descrição	73
4.10.2 Dimensões finais do aeromotor	73
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
5.1 Experimentos utilizando o aeromotor de eixo vertical	76

5.2	Medição de rotação do eixo do aeromotor, velocidade do vento e parâmetros atmosféricos	77
5.2.1	Medição da velocidade do eixo	81
5.2.2	Cálculo da velocidade de ponta de pá - TSR	82
5.2.3	Medição da velocidade de partida.....	84
5.3	Medição do torque no eixo	85
5.3.1	Cálculo do torque teórico do eixo	88
5.3.1.1	Correção da densidade do ar local	88
5.3.1.2	Cálculo da velocidade angular	89
5.3.1.3	Cálculo do ângulo de ataque	89
5.3.1.4	Cálculo do torque no eixo	89
5.3.2	Cálculo do coeficiente de potência	93
5.4	Comparativo com turbinas eólicas comerciais	94
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100
	BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Durante toda a década de sessenta até o início da década de setenta o custo da energia elétrica foi mantido praticamente constante em todo o mundo. A matriz energética era baseada em usinas termoelétricas que utilizavam o carvão ou óleo combustível como fontes primárias. Com o advento do escalonamento do preço do petróleo no início dos anos setenta o custo da energia aumentou com uma taxa média anual entre 11% a 12 % (ANDRÉAS J. C., 1982).

A partir de então os países importadores de petróleo iniciaram uma série de procedimentos de tal forma a mudar o panorama das respectivas matrizes energéticas. Estudos realizados naquela época mostravam que, se o consumo energético anual continuasse na mesma escala as reservas mundiais de petróleo estariam esgotadas em cinquenta anos, seguidas pelas de carvão que se esgotariam em duzentos anos (ANDRÉAS J. C., 1982).

Desde então, as buscas por outras fontes de energia que pudessem substituir as usuais iniciaram. Diversos países iniciaram a exploração de diferentes recursos naturais de modo que a matriz energética dos países consumidores de energia começou a mudar.

Entre as novas energias que começaram a ser utilizada está a nuclear, que se mostrou valiosa do ponto de vista de geração de energia elétrica, porém sempre apresentou muitos riscos operacionais e ao meio ambiente, como por exemplo, o aquecimento de rios e ecossistemas vizinhos às usinas bem como resíduos operacionais radioativos.

O Brasil, por possuir abundância de recursos hídricos, começou a aumentar sua capacidade geradora através da instalação de usinas hidroelétricas, que apesar de não lançarem diretamente gases poluentes na atmosfera durante a produção de energia elétrica, agridem o meio ambiente devido à inundação de áreas próximas dos reservatórios, além do que, a inundação de áreas de florestas causa a liberação de

gases tóxicos na atmosfera, devido à decomposição da madeira em contato com a água.

Outras fontes de energia alternativas estão sendo cada vez mais estudadas, aplicadas e passam a fazer parte das matrizes energéticas dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Estas fontes de energia trazem em sua maioria a grande vantagem de não emitir ou emitir em escala reduzida gases e agentes poluidores ao meio ambiente. Entre as mais utilizadas atualmente estão a solar e a eólica.

1.2 Importância

As fontes de energias alternativas têm sido utilizadas frequentemente em países desenvolvidos para geração de energia elétrica descentralizada e em pequena escala contribuindo consideravelmente para a proteção do clima global de uma maneira sustentável e sem agressão ambiental.

As fontes eólicas estão dentre as mais utilizadas e pesquisadas atualmente e vêm aumentando sua participação nas matrizes energéticas de diversos países, dentre eles o Brasil.

A velocidade dos ventos incidentes no Brasil mostra que o país é promissor na geração de energia elétrica através de fonte eólica. Na região do Vale do Paraíba a incidência dos ventos está abaixo da média nacional e ainda assim se apresenta um cenário otimista para a geração eólica, os valores médios de velocidade dos ventos mensais em Guaratinguetá variam de 2,8 a 3,8 m/s (MOURA, L. F. S., 2010).

A grande maioria dos aeromotores desenvolvidos na atualidade é de eixo horizontal e são máquinas de médio e grande porte.

Os consumidores residenciais e de pequenas propriedades rurais não possuem muitas alternativas viáveis para utilização de fonte eólica para geração de energia elétrica ou bombeamento de água visto que os preços de mercado destas máquinas inviabilizam sua aquisição.

Existe então uma necessidade de desenvolvimento e estudo de aeromotores capazes de trabalhar em ambientes urbanos e que tenham o custo de aquisição baixo o suficiente para se tornarem atraentes para consumidores residenciais.

1.3 Justificativa

A grande maioria dos trabalhos voltados ao estudo da energia eólica tanto no que tange a parte aerodinâmica da máquina bem como no desenvolvimento estrutural, transmissão mecânica e geração elétrica está relacionada a máquinas de eixo horizontal. Comercialmente, as máquinas de eixo horizontal são predominantes, estão disponíveis em diversos tamanhos e modelos, com diferentes tipos de rotores e número de pás, porém na sua grande maioria possuem preços elevados o que exige um grande investimento inicial inviabilizando sua utilização por usuários de pequeno e médio porte. A não ser que se haja incentivo financeiro para aquisição, os equipamentos não são viáveis na grande maioria das regiões brasileiras devido ao preço inicial e as velocidades médias de vento presentes nas localidades.

A maioria das regiões brasileiras apresenta potencial eólico para produção de energia elétrica, porém nem sempre a máquina correta está disponível para utilização, o que acaba inviabilizando o negócio (CRESESB, 2012).

Além dos custos iniciais de aquisição e instalação, as máquinas de eixo horizontal apresentam um complicador em relação às de eixo vertical, a manutenção mais cara ao longo da vida do equipamento, pois o gerador elétrico está situado na parte superior da torre enquanto que nas de eixo vertical está situado próximo ao solo.

Tendo em vista o cenário exposto esta dissertação tem o objetivo de demonstrar que aeromotores de eixo vertical são viáveis de serem utilizados para geração de energia elétrica e que possuem diversas vantagens construtivas e de manutenção em relação aos de eixo horizontal.

1.4 Delimitações do assunto e formulação de hipóteses

Este trabalho se propõe a estudar, construir e avaliar o desempenho de um aeromotor de eixo vertical instalado no Centro de Energias Renováveis da UNESP, no campus de Guaratinguetá-SP, como mostrado na Figura 1.



Figura 1 – Aeromotor de eixo vertical com rotor H

1.5 Objetivo da pesquisa

Desenvolver e construir um aeromotor de eixo vertical, fazendo uso de materiais de baixo custo e simplificando os sistemas componentes, tais como, transmissão e pás.

Utilizar pás construídas com perfis NACA da série 4 dígitos, adicionados de uma abertura no bordo de fuga, conhecido como slot, a fim de baixar a velocidade de partida.

Demonstrar a metodologia empregada para este projeto e análise técnica.

1.6 Estrutura da dissertação

A primeira etapa deste estudo está descrita no Capítulo 2, e consiste em uma revisão bibliográfica sobre energia eólica. Os principais modelos de turbinas eólicas bem como suas principais características foram abordadas. A evolução da construção das máquinas eólicas foi brevemente descrita nesta etapa do trabalho assim como suas

principais características, no que tange ao projeto e construção, conceitos de aerodinâmica, impacto ambiental e custos com manutenção.

O Capítulo 3 descreve os sistemas de geração eólicos explicando o princípio de funcionamento dos aeromotores de eixo horizontal e de eixo vertical. Neste capítulo foi feita a demonstração da fórmula utilizada para se calcular a potência gerada por um aeromotor, assim como uma demonstração do limite de Betz, pelo qual se determina o máximo rendimento aerodinâmico possível que um aeromotor pode desenvolver. Estas fórmulas são aqui tratadas em detalhes, pois são a base para o entendimento do desempenho geral de um aeromotor.

Ainda no Capítulo 3 foram descritos os principais parâmetros que influenciam o desempenho de um aeromotor. Estes fatores, tais como solidicidade das pás, velocidade de ponta de pá e torque gerado são discutidos um a um, as formulações são mostradas a fim de que sirvam de base para o projeto que se segue.

O projeto do aeromotor é apresentado passo a passo no Capítulo 4. Nesta etapa foram descritas as premissas que levaram o projeto a considerar um aeromotor de eixo vertical, com rotor de três pás, o ideal para o local de instalação. As considerações e citações levaram em conta o material bibliográfico utilizado neste trabalho.

Antes de iniciar as considerações e conclusões de cada etapa do projeto, foi feito um estudo sobre o local de instalação, a incidência de ventos e os valores médios de velocidade de vento observados no local de instalação. Na sequência foram tratadas as diversas variáveis que vieram a determinar o modelo de aeromotor construído. O software Design Foil (DREESECODE, 2011) foi utilizado para modelar o perfil aerodinâmico utilizado para a construção das pás do aeromotor; através da utilização deste software foi possível fazer modificações no perfil NACA padrão e assim aumentar a capacidade de geração de força de sustentação no perfil final utilizado, em comparação ao perfil padrão.

A etapa seguinte do projeto foi estudar os possíveis ganhos que uma abertura traseira no perfil, chamada de slot traria se utilizada neste projeto; a idéia deste tipo de solução é diminuir a velocidade média de partida do aeromotor e com isso aumentar sua faixa de utilização.

O eixo de transmissão, bem como o redutor de velocidades também foram levadas em consideração no projeto a fim de se encaixarem da melhor maneira no escopo final do equipamento.

O projeto teve como premissas o baixo custo de aquisição de materiais e de fabricação. As peças foram fabricadas em aço carbono, com excessão das pás e seus suportes que foram feitos em liga de alumínio.

Vale ressaltar que estes materiais, apesar de serem baratos, não constituem o que há de melhor para a construção de aeromotores por serem pesados demais para máquinas que geram baixa potência de saída. O ideal nestes casos seria optar por materiais mais nobres, tais como, compostos de carbono para a construção das pás e seus suportes, e liga de alumínio para a transmissão, isto reduziria drasticamente o peso final, conferindo mais desempenho ao aeromotor, mas teria o alto custo como fator limitante.

O Capítulo 5 trata dos resultados experimentais e da descrição dos instrumentos que foram utilizados neste trabalho. Foram realizados experimentos no aeromotor de eixo vertical com a finalidade de determinar seu desempenho geral, para isto foram medidos diversos parâmetros, tais como, rotação do eixo do aeromotor, velocidade do vento incidente nas pás e torque na saída do redutor de velocidades. Os resultados dos experimentos são apresentados através de gráficos. Ainda no Capítulo 5, fez-se um comparativo dos resultados de potência e velocidade de partida com aeromotores disponíveis comercialmente.

A conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros estão descritos no Capítulo 6, onde foram feitas as considerações para o completo entendimento dos resultados obtidos nos experimentos e foram apontados pontos de melhoria no projeto, com a finalidade de melhorar o desempenho, a serem consideradas em trabalhos futuros.

2. ASPECTOS GERAIS SOBRE ENERGIA EÓLICA

2.1 Histórico

A energia eólica tem sido usada pelo homem há pelo menos 3000 anos, principalmente para moagem de grãos e bombeamento de água, enquanto que para os antigos barcos, o vento tem sido uma fonte essencial de potência por um tempo ainda maior.

Em países mais desenvolvidos da Europa e nos EUA, desde o século XIX, a energia eólica tem sido usada, porém, seu uso perdeu força no momento que os combustíveis fósseis (derivados do petróleo) ganharam produção em larga escala e a eletrificação chegou às zonas rurais.

Ainda no século XIX, os países que estavam na liderança do desenvolvimento eólico eram os EUA e a Dinamarca, cientistas destes países trabalhavam essencialmente em máquinas de eixo horizontal. Além destes países a antiga União Soviética, França e Alemanha também tinham cientistas trabalhando em máquinas de eixo horizontal e que tinham a capacidade de geração de até 1MW (ERIKSSON, S., 2008).

Apesar destes desenvolvimentos o assunto Energia Eólica somente ganhou força após o aumento substancial do preço do petróleo no ano de 1973. A partir deste momento países como EUA, Alemanha, Inglaterra e Suécia despontaram como principais desenvolvedores de novas turbinas capazes de produzir cada vez mais eletricidade. Os estudos eram financiados, em sua grande maioria, por instituições governamentais.

Não existia na época um consenso sobre qual modelo de turbina apresentaria melhor desempenho e por isso diversos modelos em escala real foram construídos. Estes modelos incluíam turbinas com uma, duas ou três pás. Turbinas de eixo horizontal e vertical eram testadas e modelos como a Darrieus e o Rotor H já eram experimentados (ERIKSSON, S., 2008).

O impulso inicial para o desenvolvimento de turbinas eólicas foi o aumento do preço do petróleo e hoje em dia é a diminuição da emissão de CO_2 através de uma fonte limpa e renovável de geração elétrica.

Estudos mostram que a energia eólica tem um papel fundamental no aumento da capacidade mundial instalada de fontes renováveis de geração elétrica, passando de 2.5 GW em 1995 para 40 GW em 2010 (ENERCON, 2012).

2.2 Aeromotores

2.2.1 Aspectos gerais e componentes

São máquinas capazes de transformar a energia cinética dos ventos em energia mecânica na forma de rotação de um eixo.

Dentre as principais utilizações destas máquinas está a geração de energia elétrica, quando estão acopladas a um gerador elétrico. Neste caso são também chamadas de aerogeradores. Outras utilizações comuns para máquinas eólicas são: bombeamento de água e moagem de grãos.

Os aerogeradores são, em geral, classificados quanto à:

- Forma construtiva:

- Turbinas eólicas de eixo horizontal (HAWT – horizontal axis wind turbine).

A Figura 2, detalhe A apresenta uma máquina de eixo horizontal;

- Turbinas eólicas de eixo vertical (VAWT – vertical axis wind turbine).

A Figura 2, detalhe B apresenta uma máquina de eixo vertical.

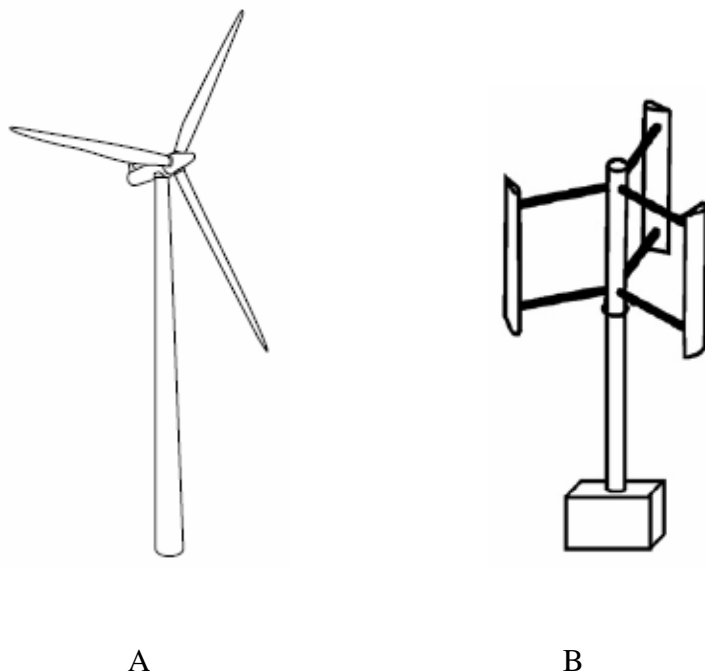


Figura 2 - A: HAWT (WAHL, M., 2007) B: VAWT (ERIKSSON, S., 2008)

- Tipo das pás:

- Pás de arrasto - movidas pela força de arrasto causada pelo impacto do fluxo de ar sobre suas superfícies;
- Pás de sustentação – possuem um perfil aerodinâmico definido e quando o fluxo de ar passa pelas pás causa o aparecimento de uma força de sustentação perpendicular ao fluxo de ar, gerando movimento. O rotor Darrieus que pode ser visto na Figura 3 é equipado com pás de sustentação.

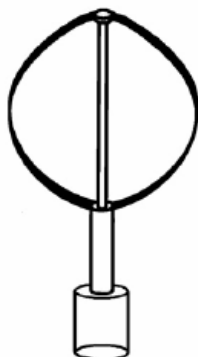


Figura 3 - Rotor Darrieus com pás de sustentação (ERIKSSON, S., 2008)

- Potência nominal do gerador:

- Pequeno Porte (até 50kW de potência);
- Médio Porte (potência de 50 a 1000kW);
- Grande Porte (acima de 1MW de potência).

Os principais sistemas que compõem um aerogerador são:

- Rotor - É o componente que efetua a transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica de rotação. No rotor são fixadas as pás da turbina;
- Nacela – A nacela está presente nos aerogeradores de eixo horizontal. É o compartimento instalado no alto da torre que abriga todo o mecanismo do gerador, o qual pode incluir: caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico e sistema hidráulico de acionamento de freios;
- Eixo de transmissão – Está presente tanto nos aerogeradores de eixo horizontal bem como nos de eixo vertical. É o elemento responsável pela transmissão da potência mecânica captada pelo rotor até a caixa multiplicadora ou redutora de velocidades;
- Torre - É o elemento que sustenta o rotor e a nacela na altura adequada ao funcionamento da turbina eólica, no caso dos aerogeradores de eixo horizontal ou que sustenta o rotor apenas nos aerogeradores de eixo vertical. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema.

Em geral, as torres são fabricadas de metal (treliçada ou tubular) ou de concreto.

As torres de aerogeradores de pequeno porte são estaiadas (sustentadas por cabos tensores) enquanto as das turbinas de médio e grande porte são auto-portantes.

A Figura 4 apresenta duas ilustrações onde são citados as principais dimensões dos aeromotores de eixo horizontal e de eixo vertical e também seus principais componentes.



Figura 4 – Componentes de um aerogerador. A: HAWT (REIS, L. O. M., 2002), B: VAWT (REIS, L. O. M., 2002)

Na maioria das máquinas que possuem a finalidade de geração elétrica, o eixo de transmissão apresenta uma velocidade de rotação baixa sendo necessário aumentar a rotação utilizando um multiplicador de velocidades de engrenagens. Após o multiplicador é conectado o gerador elétrico que transforma a energia mecânica em elétrica.

Os geradores assíncronos são utilizados em sistemas de geração eólica devido à robustez, ao baixo custo e a facilidade de manutenção (ABDULRAHMAN, L A, 2000) (OLEG, C., 1999).

Existem também aerogeradores de grande porte que utilizam geradores síncronos de ímãs permanentes que operam com baixa rotação dispensando a caixa multiplicadora, este tipo de acoplamento eixo/gerador é chamado de acoplamento direto.

Os aerogeradores de eixo horizontal comerciais apresentam sistemas de controle de velocidade a fim de proteger o conjunto mecânico contra velocidades excessivas que poderiam danificar as pás ou a transmissão do equipamento.

Os sistemas mais comuns utilizados para controle de velocidade são chamados de controles por Stall ou Pitch. No controle por stall, em altas velocidades de vento, há o desprendimento da camada limite do fluxo de ar do perfil aerodinâmico gerando

vórtices, que são escoamentos aerodinâmicos circulares ou espirais, e assim aumentando o arrasto e diminuindo a velocidade angular, como mostrado no detalhe C da Figura 5. No controle por pitch, através de um mecanismo, o ângulo de ataque das pás é variado a fim de ficar em posição perpendicular em relação ao fluxo de ar.

Neste tipo de controle de velocidade diminui-se a sustentação aerodinâmica e, conseqüentemente, a rotação do rotor, como mostrado no detalhe B da Figura 5.

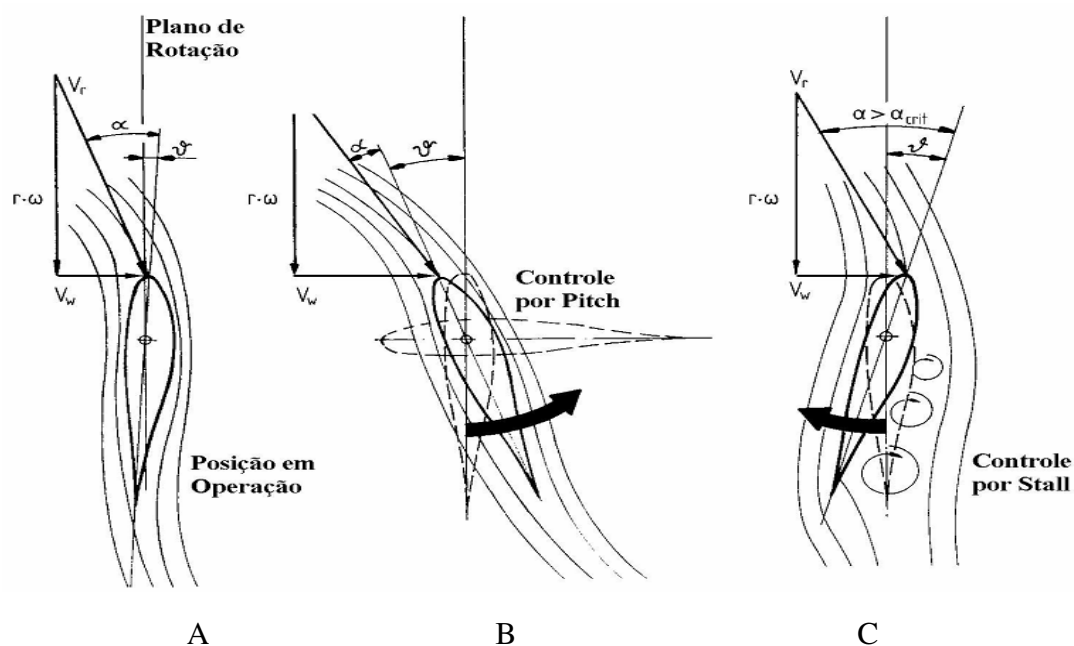


Figura 5 – Controle de velocidade através da variação do ângulo de ataque (WENZEL, G. M., 2007).

2.2.2 Evolução e desenvolvimento

Charles Brush, um engenheiro americano, fez um dos primeiros experimentos que se tem notícia acoplando um aeromotor a um gerador de eletricidade em 1888. Depois dele outros vieram e aperfeiçoaram seu experimento e, um dos mais importantes avanços foi dado por Marcellus Jacobs que construiu uma turbina composta por três pás com perfil aerodinâmico, um gerador acoplado ao eixo principal e uma bateria para armazenar o excedente de energia produzida. Esta máquina possuía um sistema de controle direcional a fim de alinhar a turbina contra o fluxo de ar, o que representou um grande avanço perante outros modelos da mesma época.

Durante os anos seguintes os aeromotores de eixo horizontal continuaram a ser o alvo principal dos construtores.

Os aerogeradores de eixo vertical foram desenvolvidos em paralelo aos de eixo horizontal, mas com menos interesse e menos suporte financeiro. O engenheiro finlandês S. J. Savonius inventou em 1922 um aeromotor de eixo vertical batizado com seu sobrenome (ERIKSSON, S., 2008). A Figura 6 apresenta um desenho de um aerogerador tipo Savonius.



Figura 6 – Aeromotor de eixo vertical Savonius (ERIKSSON, S., 2008).

Em 1931, G. Darrieus patenteou a idéia de uma turbina de eixo vertical com lâminas retas ou torcidas projetadas seguindo um perfil aerodinâmico a fim de serem movidas pelas forças de sustentação (ERIKSSON, S., 2008). A Figura 7 apresenta um desenho de um aerogerador tipo Darrieus.



Figura 7 – Aeromotor de eixo vertical Darrieus (ISLAM, M., 2008)

Durante os anos 70 e 80 os aeromotores de eixo vertical voltaram a entrar em foco quando o Canadá e os EUA construíram diversos protótipos experimentais do modelo Darrieus. Estas máquinas provaram ser eficientes e tão confiáveis quanto às de eixo horizontal.

De acordo com um relatório emitido pelo laboratório Sandia, as máquinas de eixo vertical foram vítimas da baixa demanda de mercado nos EUA; a última máquina de eixo vertical construída pela Sandia foi desmontada em 1997 após a constatação de trincas em sua base (ERIKSSON, S., 2008).

Em 1980 a empresa americana FloWind comercializou aeromotores tipo Darrieus e montou diversas fazendas eólicas com este tipo de máquina (ERIKSSON, S., 2008).

As máquinas trabalharam eficientemente e sem falhas, mas tiveram problemas de fadiga nas pás que eram projetadas para se deformar elasticamente (sem deformação permanente) em caso de rajadas de vento.

Os aeromotores conhecidos como rotores H são nada mais que turbinas Darrieus de pás retas, e também foi idealizada por G. Darrieus veja Figura 8.

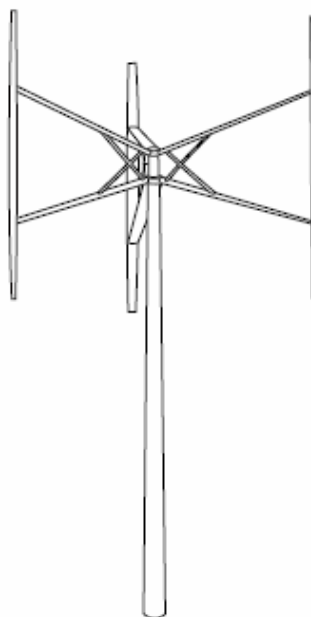


Figura 8 – Aeromotor de eixo vertical - Rotor H (WAHL, M., 2007).

2.2.3 Características dos aeromotores de eixo horizontal e de eixo vertical

2.2.3.1 Projeto e instalação

Vários aspectos diferenciam os aeromotores de eixo vertical dos de eixo horizontal em termos de projeto.

A direção do eixo é talvez a diferença mais marcante entre os dois tipos de projeto considerado, o VAWT apresenta a vantagem de ter o gerador instalado no nível do solo, facilitando a manutenção, reduzindo o tamanho da torre e permitindo a utilização de um gerador maior sem preocupações com peso. A transmissão é bem mais simples uma vez que estas máquinas costumam apresentar transmissão direta (sem caixa de velocidades) no acoplamento com o gerador.

Os aeromotores de eixo horizontal precisam de geradores leves, porque são instalados na nacela no topo da torre. Estas máquinas possuem a torre mais robusta e, tendo em vista que possuem um melhor rendimento com fluxo de ar sem turbulência, em geral são instaladas a alturas bem superiores aos aeromotores de eixo vertical. A transmissão é outra fonte de peso sobre a torre. Alguns modelos modernos usam

transmissão direta, mas ainda apresentam maiores custos de produção devido ao alto número de pólos necessários aos seus geradores.

Os aeromotores de eixo vertical não precisam de nenhum mecanismo de guinada (leme direcional), o que contribui para baixar o custo do equipamento. O vento vindo de qualquer direção pode produzir movimento de rotação no aeromotor. Esta configuração apresenta uma maior eficiência em comparação ao de eixo horizontal quando instaladas em telhados, na proximidade de obstáculos ou ainda em terreno montanhoso onde o vento muda de direção com frequência. Durante o tempo que uma turbina de eixo horizontal está guinando, seu desempenho é muito prejudicado.

Os aeromotores de eixo horizontal, por outro lado, têm necessidade de um mecanismo de guinada para alinhar as pás contra o fluxo de ar. Estas máquinas apresentam melhor desempenho quando instaladas longe de rajadas de vento e turbulência.

A estrutura de um aeromotor de eixo vertical com pás de perfil constante (Rotor-H) é a mais simples quando comparada a outros tipos de aeromotores, as pás apresentam um perfil aerodinâmico constante e uma corda constante em todo o comprimento da pá, o que faz o projeto e construção mais fácil, o rotor Darrieus por sua vez, apresenta uma condição intermediária onde as pás torcidas possuem variação da corda ao longo do comprimento. Os aeromotores de eixo horizontal possuem pás na configuração cantilever (em balanço), fazendo com que sua estrutura interna seja mais robusta e com maiores custos. Os aeromotores de eixo horizontal têm perfis aerodinâmicos variáveis ao longo do comprimento e pás torcidas para aumentar o desempenho.

Outro item sempre considerado no projeto de um aeromotor é a força que as pás estão sujeitas durante o funcionamento. Os aeromotores de eixo vertical são propensos a sofrer grandes momentos de flexão e os de eixo horizontal estão mais sujeitos à fadiga induzida pelo próprio peso além de forças de cisalhamento. Em todos os casos as lâminas das máquinas modernas de grande porte são construídas de material composto (fibra de vidro ou fibra de carbono) para suportar os esforços e as de menor porte, em geral, em alumínio.

2.2.3.2 Aerodinâmica

O desempenho aerodinâmico de um aeromotor é dado em função de seu coeficiente de potência, que mostra o quanto de potência a turbina pode extrair do fluxo de ar.

O coeficiente de potência máximo teórico é de 0,593, de acordo com o limite de Betz para aeromotores de eixo horizontal e 0,554 para aeromotores de eixo vertical (WILSON, R.E., 1980).

Baseado nos aeromotores disponíveis no mercado, os de eixo horizontal são mais eficientes que os de eixo vertical devido à orientação das pás.

Uma característica marcante dos aeromotores de eixo vertical é de que em geral elas utilizam aerofólios NACA simétricos de 4 dígitos na construção das pás, por se mostrarem adequados para um bom desempenho da máquina, mas que tem como contra partida velocidade de partida elevada (ERIKSSON, S., 2008) (WAHL, M., 2007).

O ruído aerodinâmico é outra questão a ser abordada durante a instalação de um aeromotor. As máquinas de eixo horizontal são as mais ruidosas que as de eixo vertical devido ao fato de que nestes modelos a rotação das pás é superior ao das máquinas de eixo vertical. Os aeromotores de eixo vertical com pás de perfil constante, também conhecidos como Rotor-H são os mais silenciosos.

Outra vantagem notória dos aeromotores de eixo vertical sobre os de eixo horizontal é relativa à caixa de velocidades. Ela fica instalada no nível do solo causando menos ruído do que se fosse instalada no topo da torre, além do que a manutenção se torna mais barata.

2.2.3.3 Impacto ambiental

A área ocupada e ruído são os principais fatores ambientais a serem considerados durante a instalação de um aeromotor.

O ruído é a maior preocupação, mas depende do tipo de turbina considerada. A principal fonte de ruído em um aeromotor é proveniente de suas pás em movimento (ruído aerodinâmico) e sistema de transmissão.

2.2.3.4 Custos

Os custos globais envolvendo um aeromotor são geralmente medidos em USD / kWh; como a potência de um aeromotor depende de seu coeficiente de potência, o custo relativo de um aeromotor de eixo horizontal geralmente é menor do que o de um aeromotor de eixo vertical devido ao fato de que o coeficiente de potência dos aeromotores de eixo vertical é menor e, somado a este fato, há a produção em escala dos de eixo horizontal que contribui para baratear os custos finais do equipamento.

Outro aspecto que contribui para os custos finais das turbinas eólicas é sua manutenção. Neste aspecto, as máquinas de eixo vertical são muito menos dispendiosas para se manter, devido ao fato de que a manutenção pesada é realizada em sistemas da máquina instalados no nível do solo (caixa de velocidades, gerador).

Em poucas palavras, as máquinas de eixo horizontal geralmente são mais baratas no momento da aquisição, devido à escala de produção e, as de eixo vertical são menos dispendiosas para manter ao longo do tempo. Esses fatores devem ser pesados na seleção de um equipamento para compor um novo parque eólico.

Outro fator que pesa a favor das máquinas de eixo vertical, quando se considera a composição de um parque eólico, é o fato de que elas podem ser instaladas em uma distância muito menor entre máquinas do que num parque eólico composto por máquinas de eixo horizontal. Isto se deve ao fato de que, apesar das turbinas de eixo horizontal possuírem um rendimento aerodinâmico superior, elas produzem uma esteira aerodinâmica maior do que as de eixo vertical. A esteira aerodinâmica pode ser entendida como o fluxo de ar turbulento gerado após a passagem do fluxo de ar pelas pás da turbina. Esta esteira diminui o rendimento aerodinâmico da turbina que está em seu campo de atuação. Já as de eixo vertical, além de produzirem uma esteira consideravelmente menor, são menos susceptíveis a ela, ou seja, as máquinas continuam apresentando rendimento similar independente de estarem sob influência ou não da esteira aerodinâmica produzida pela máquina adjacente (WHITTLESEY, R. W, 2010).

2.3 Aplicações dos aeromotores

Tendo em vista as principais características das máquinas eólicas, os modelos de eixo horizontal e eixo vertical possuem aplicações distintas no que tange a geração elétrica.

De modo geral, as máquinas de eixo vertical apresentam diversas vantagens em relação às de eixo horizontal quando se necessita um equipamento de baixo custo relativo para aplicações de baixa potência. Os rotores Darrieus e H são ideais para aplicações urbanas, onde se tem muita turbulência no fluxo de ar e mudanças de direção do fluxo de ar constantemente.

Os rotores H são ainda mais vantajosos porque possuem as pás com perfil constante e de fácil construção, além de compartilhar com o modelo Darrieus a facilidade de manutenção por possuírem o sistema gerador próximo ao solo e de não necessitarem de torres robustas, visto que o peso suspenso é baixo comparado às máquinas de eixo horizontal.

As máquinas de eixo horizontal já se encontram bem estabelecidas no mercado mundial com diversos fabricantes oferecendo modelos desde pequeno até grande porte. São máquinas que possuem uma eficiência aerodinâmica maior e que por isso podem ser construídas com um diâmetro menor, para uma mesma potência de saída comparativamente às de eixo vertical.

As máquinas de eixo horizontal também estão disponíveis para aplicações residenciais, mas em geral são indicadas para instalações rurais e com torres mais altas do que as utilizadas para as de eixo vertical.

3. SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICO

3.1 Aspectos gerais sobre aerodinâmica das máquinas eólicas

3.1.1 Princípio de Funcionamento dos Aeromotores de Eixo Horizontal

As máquinas eólicas de eixo horizontal compostas de pás com perfil aerodinâmico giram devido à existência de uma força de sustentação. Esta força está presente sempre que um fluxo de ar atravessa o perfil aerodinâmico, como mostrado na Figura 9.

As pás são construídas utilizando-se perfis aerodinâmicos conhecidos, dentre eles os mais utilizados são os aerofólios das famílias NACA de 4 e 5 dígitos.

Devido à geometria da lâmina, a de massa de ar que escoou pela superfície superior atinge velocidades maiores que as da superfície inferior, resultando em uma região de baixa pressão na sua superfície superior, princípio similar ao que ocorre nas asas dos aviões.

A diferença de pressão gera a força de sustentação e induz a força de arrasto que é perpendicular à de sustentação.

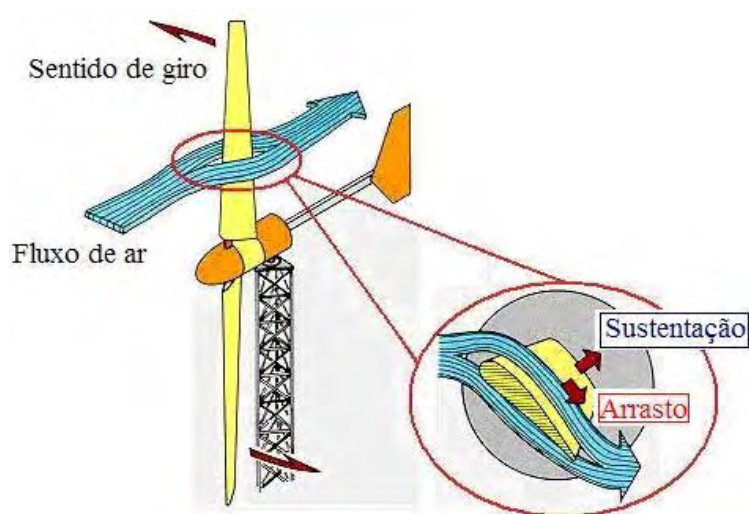


Figura 9 – Princípio aerodinâmico das HAWT (REIS, L.O. M., 2002)

3.1.2 Princípio de Funcionamento dos Aeromotores de Eixo Vertical

O movimento do rotor das máquinas de eixo vertical compostas por pás com perfil aerodinâmico também depende da existência de uma força de sustentação presente nas pás sempre que houver fluxo de ar passando pelo rotor.

A velocidade do fluxo de ar a favor e contra o sentido de giro do aeromotor varia de acordo com a posição angular das pás e isto causa o aparecimento de uma velocidade de vento relativa, também chamada de aparente. Este é o vento que de fato incide nas pás quando em movimento.

Se o ângulo de ataque do vento aparente sobre a pá for maior que zero, uma força de sustentação é gerada e propela a turbina.

A Figura 10 apresenta um esquema simplificado deste princípio mostrando a direção da força de sustentação nas pás e o sentido de giro do rotor.

Um ponto negativo das máquinas de eixo vertical é a dificuldade de partida, em geral necessitam de um impulso externo inicial, por outro lado o fato de não necessitarem de um sistema de leme direcional compensa esta deficiência.

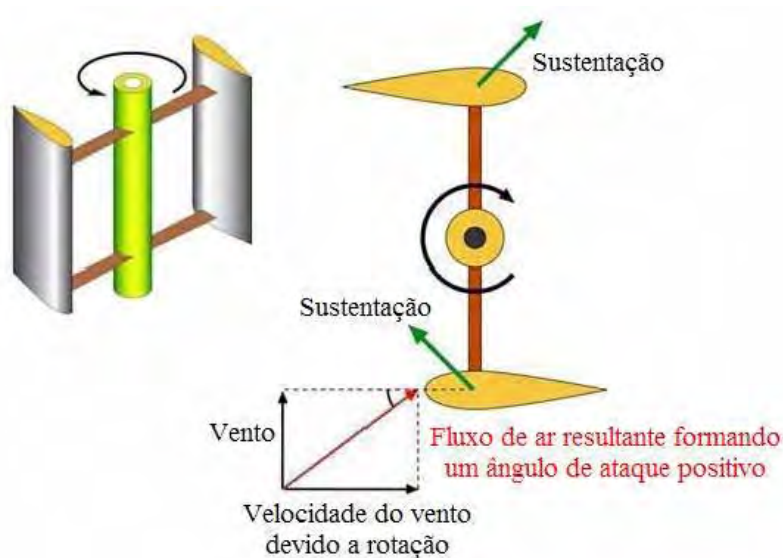


Figura 10 – Princípio aerodinâmico das VAWT

3.1.3 Curvas Típicas de Desempenho de Aeromotores

Os ventos com baixa velocidade não têm energia suficiente para acionar os aeromotores, que só funcionam a partir de uma determinada velocidade mínima, que normalmente varia entre 2,5m/s e 4,0m/s.

Com o aumento da velocidade do vento, a potência no eixo da máquina aumenta gradativamente até atingir potência máxima, isto ocorre a uma determinada velocidade de vento, a qual varia geralmente entre 14 m/s e 25,0m/s, para máquinas de eixo horizontal disponíveis comercialmente (ENERCON, 2012).

Para velocidades do vento superiores à nominal, em muitas máquinas, a potência permanece constante até uma velocidade de corte superior, na qual a máquina deve sair automaticamente de operação para evitar que sofra danos estruturais. É importante saber que a energia disponível varia com o cubo da velocidade do vento, de forma que o dobro de velocidade representa um aumento de oito vezes em energia (CRESESB, 2012).

A Figura 11 apresenta as curvas típicas de uma máquina eólica mostrando a relação entre potência e velocidade do vento incidente e coeficiente de potência e velocidade do vento. Observa-se que o coeficiente de potência varia com a velocidade do vento, aumentando até certo limite, próximo a 10 m/s de velocidade de vento e, após este valor observa-se uma queda devido às perdas aerodinâmicas.

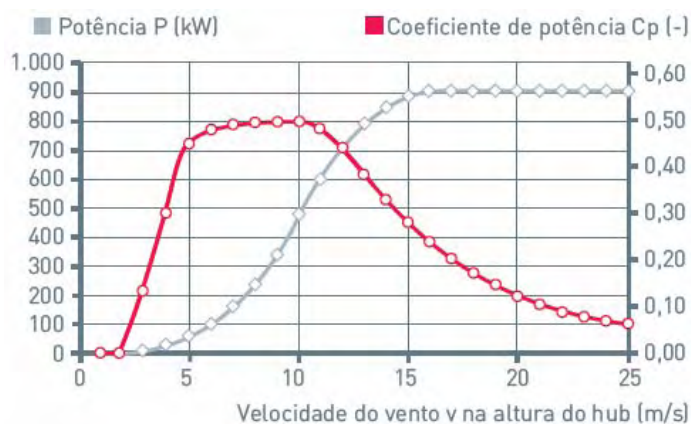


Figura 11 - Curvas características de um aerogerador (ENERCON, 2012)

3.2 Potência e rendimento aerodinâmico das turbinas eólicas

As turbinas eólicas são máquinas capazes de extrair parte da energia cinética dos ventos e convertê-la em energia mecânica.

A potência e o rendimento aerodinâmico, também conhecidos como coeficiente de potência estão intimamente relacionados com o desempenho de qualquer turbina eólica.

3.2.1 Determinação da Potência

Para a determinação da potência de uma turbina eólica, deve-se considerar que pelo rotor desta turbina passa um fluxo de ar e que este fluxo de ar possui velocidade constante. Pode-se assumir que uma determinada partícula de ar leva certo tempo para percorrer um determinado comprimento de um tubo aerodinâmico imaginário com área frontal conhecida.

A massa de ar que passa por esse tubo imaginário tem densidade específica conhecida e é definida pela equação (1).

$$m = \rho A V_{\infty} \Delta t \quad (1)$$

Sendo:

m = massa de fluido

ρ = densidade do ar

A = área frontal de um tubo aerodinâmico

V_{∞} = velocidade do fluxo de ar em fluxo livre

Δt = variação de tempo

A potência pode ser definida como trabalho por unidade de tempo, como mostra a equação (2).

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (2)$$

Sendo:

P = potência

W = trabalho

O trabalho realizado pelo vento no rotor da turbina ocorre devido a sua energia cinética, visto que o fluxo que passa pelo rotor está na horizontal, e pode ser definido como mostrado na equação (3).

$$W = E_c = \frac{mV_\infty^2}{2} \quad (3)$$

Sendo:

E_c = energia cinética

Relacionando a potência e a energia cinética e então substituindo a equação (3) na equação (2), obtém-se a equação (4).

$$P = \frac{\frac{mV_\infty^2}{2}}{\Delta t} = \frac{mV_\infty^2}{2\Delta t} \quad (4)$$

Como já mencionado, o ar que passa pela turbina tem velocidade constante, logo a vazão de ar que passa pela turbina pode ser escrita como mostrado na equação (5).

$$\frac{m}{\Delta t} = \dot{Q} = \rho V_\infty A \quad (5)$$

Sendo:

\dot{Q} = vazão

Substituindo-se a equação (5) na equação (4), tem-se:

$$P = \frac{\rho V_{\infty}^3 A}{2} \quad (6)$$

3.2.2 Determinação do Coeficiente de Potência

O tubo aerodinâmico imaginário que atravessa o rotor de uma turbina tem diâmetro menor que o rotor da turbina pelo qual ele passará, visto que quando o fluxo está prestes a passar pelo rotor ele sofre uma desaceleração e se expande assumindo o diâmetro do rotor, como está ilustrado na Figura 12.

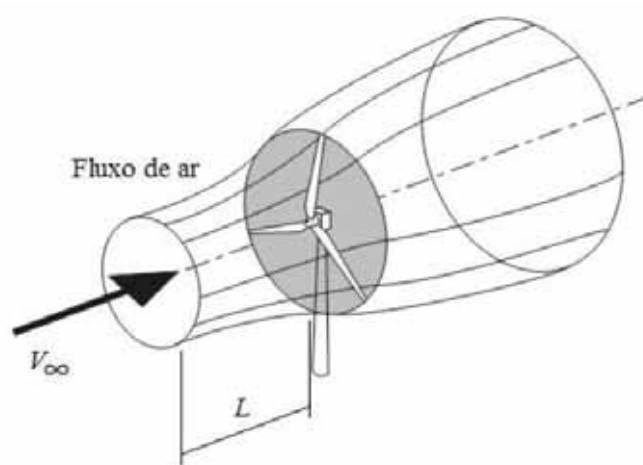


Figura 12 – Tubo aerodinâmico imaginário sobre uma turbina eólica (BURTON, T., 2001)

O fluxo de ar, ao passar pela turbina, perde velocidade e esta diferença de velocidade entre o fluxo de ar antes e depois do rotor é a energia cinética captada pela turbina. O tubo aerodinâmico imaginário após a passagem pela turbina tem seu diâmetro aumentado em relação ao diâmetro da turbina, como pode ser observado na Figura 13 (BURTON, T., 2001). Pelo fenômeno exposto deduz-se que o rendimento aerodinâmico de uma turbina eólica está abaixo do ideal, ou seja, nem toda energia cinética contida no ar é convertida em energia mecânica.

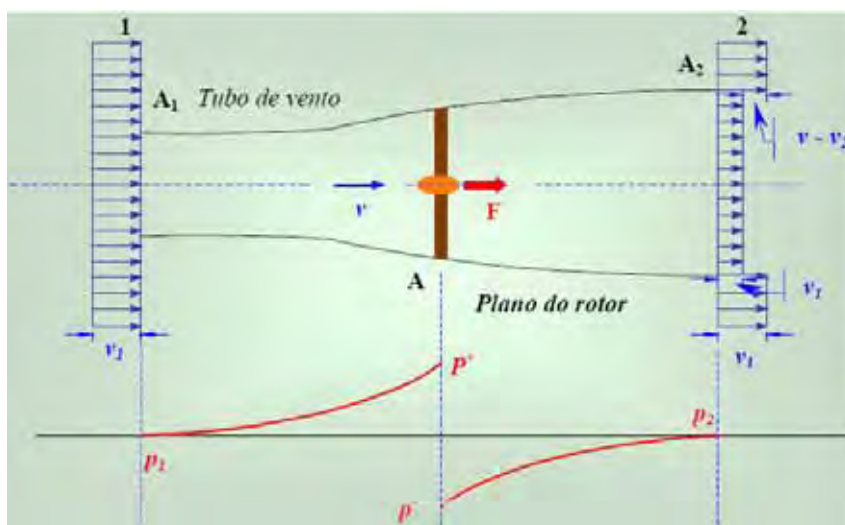


Figura 13 – Perfil de velocidade e pressão do fluxo de ar no rotor de uma turbina eólica (REIS, L. O. M, 2002)

As grandezas que aparecem na Figura 13 são definidas como:

v_1 = velocidade do vento a montante do rotor

v_2 = velocidade do vento a jusante do rotor

v = velocidade incidente no plano do rotor da turbina

F = força devido a corrente de ar sobre o plano do rotor

p_1 = pressão a montante do rotor ($p_1 = p_2 = p_{atm}$)

p_2 = pressão a jusante do rotor ($p_1 = p_2 = p_{atm}$)

P^+ = pressão no plano do rotor na tomada de ar

p^- = pressão no plano do rotor na saída de ar

O coeficiente de potência expressa esse rendimento aerodinâmico e pode ser entendido como a razão entre a potência convertida pela turbina e a potência disponível no ar que passa pelo rotor, de acordo com a equação (7).

$$C_p = \frac{P_{Conv}}{P_W} \quad (7)$$

Sendo:

C_p = coeficiente de potência

P_{Conv} = potência convertida

$P_w = P$ = potência disponível

O valor máximo teórico do coeficiente de potência é conhecido como limite de Betz depois que o engenheiro alemão Albert Betz determinou matematicamente este valor (BURTON, T., 2001).

Apesar de ser um valor teórico e de existir outras teorias mostrando que este limite seria maior, até hoje nenhuma turbina eólica superou o limite de Betz.

O limite de Betz mostra uma característica do fluxo de ar que passa pelo rotor de uma turbina eólica. Lembrando que não se trata de um modelo específico de turbina, o limite é aplicável a qualquer turbina propelida por ar. Aplicando-se o teorema da conservação da quantidade de movimento ao modelo, e sabendo-se que a massa específica do ar é conhecida, tem-se a equação (8).

$$\sum F = \rho \dot{Q} \Delta v \rightarrow F = \rho A \Delta v (v_1 - v_2) \quad (8)$$

Sendo:

ρ = densidade do ar

A força exercida pela massa de ar nas lâminas do rotor da turbina (F) pode ser calculada pela equação (9).

$$F = A(P^+ - P^-) \quad (9)$$

Aplicando-se a equação da continuidade entre os pontos 1 e o rotor da turbina, obtêm-se a equação (10).

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = P^+ + \frac{\rho}{2} v^2 \quad (10)$$

Analogamente, aplicando-se a equação da continuidade a jusante da turbina entre o rotor da turbina e o ponto 2, obtêm-se a equação (11).

$$p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p^- + \frac{\rho}{2} v^2 \quad (11)$$

Sabendo-se que $p_1 = p_2 = p$ e igualando as equações (9), (10) e (11), obtêm-se o valor da força exercida sobre o rotor da turbina, que é expressa pela equação (12).

$$F = A(P^+ - p^-) = \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho A (v_1 - v_2)(v_1 + v_2) \quad (12)$$

Assumindo-se que o valor da velocidade incidente no plano do rotor seja uma média entre a velocidade na entrada da seção 1 e na saída da seção 2 (REIS, L. O. M, 2002), obtêm-se a equação (13).

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (13)$$

Então, a velocidade do fluxo de ar incidente no plano do rotor da turbina em relação à velocidade em um ponto infinito a montante da turbina, é menor. Pode-se dizer que a velocidade foi reduzida de um fator que é chamado de coeficiente de velocidade induzida. Logo, tem-se a equação (14).

$$v = v_1 - av_1 \leftrightarrow v = v_1(1 - a) \quad (14)$$

Sendo:

a = coeficiente de velocidade induzida, adimensional

Para a velocidade a jusante da turbina, a velocidade será:

$$v_2 = v_1(1 - 2a) \quad (15)$$

Com a velocidade no rotor da turbina definida, calcula-se o valor da potência convertida pelo rotor da turbina, conforme equação (16).

$$P_{Conv} = Fv \leftrightarrow P_{Conv} = \rho Av(v_1 - v_2)v \quad (16)$$

Substituindo-se as equações (14) e (15) em (16), obtêm-se a equação (17a). A equação (17b) apresenta os dois termos componentes da equação (17a) isolados.

$$P_{Conv} = 2\rho Av_1^3 a(1 - a)^2 \quad (17a)$$

$$P_{Conv} = \left(\rho A \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2} \right) \quad (17b)$$

Verifica-se através da equação (17b) que a potência convertida pela turbina possui dois termos distintos. O primeiro refere-se ao fluxo da massa de ar incidente na turbina; e o segundo termo trata a variação da energia cinética da massa de ar incidente.

Em uma condição ideal, onde toda a energia existente na massa de ar é convertida em energia mecânica pela turbina, a velocidade do fluxo de ar a jusante da turbina seria igual a zero, mas esta condição é fictícia, assim deve-se determinar o valor da velocidade do fluxo de ar a jusante da turbina para que se obtenha a potência máxima que uma turbina eólica pode gerar. Isto equivale a dizer que a constante do limite de Betz definido na equação (14) deve ser determinado.

A potência convertida por uma turbina eólica depende do coeficiente de potência e este coeficiente é definido pela equação (7). Como são conhecidas as equações que definem ambas as potências, pode-se então calcular o valor máximo do coeficiente de

potência substituindo as equações (17a) e (6) na equação (7), obtendo-se a equação (18).

$$C_p = \frac{P_{Conv}}{P_w} = \frac{2\rho AV_1^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho AV_1^3} \quad (18)$$

Rearranjando os termos da equação (18), obtém-se a equação (19).

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (19)$$

O limite máximo do coeficiente de potência é obtido derivando-se a equação (19) e igualando-se a zero, resultando na equação (20).

$$\frac{dC_p}{da} = 3a^2 - 4a + 1 = 0 \quad (20)$$

Sendo:

$$a = \frac{1}{3} \quad (21)$$

O valor máximo para o qual ocorre a maior transferência de potência é dado pela equação (21).

Portanto, o valor do coeficiente de potência para a máxima potência extraída do ar é dado pela equação (22).

$$C_{P_Hor_m\acute{a}x} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (22)$$

O valor do coeficiente de Betz demonstrado é mais comumente utilizado para turbinas de eixo horizontal.

O rendimento aerodinâmico máximo que pode ser obtido por uma turbina de eixo vertical do tipo Darrieus é 0,554 (WILSON, R.E., 1980).

$$C_{P_Vert_máx} = 0,554 \quad (23)$$

A potência produzida por uma turbina eólica, descrita inicialmente pela equação (6) deve ser re-escrita considerando a área varrida por turbinas de eixo horizontal e o coeficiente de potência, obtém-se então a equação (24).

$$P = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^3 A_{Hor} C_p \quad (24)$$

Sendo:

A_{Hor} = área varrida pela turbina de eixo horizontal

Analogamente para aeromotores de eixo vertical, a fórmula da potência pode ser escrita como mostrado na equação (25).

$$P = \frac{1}{2} \rho V_{\infty}^3 A_{Vert} C_p \quad (25)$$

Sendo:

A_{Vert} = área varrida pela turbina de eixo vertical

3.3 Fatores que influenciam o desempenho dos aeromotores

3.3.1 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um número adimensional utilizado para o cálculo do regime de escoamento de um determinado fluido sobre uma superfície.

O número de Reynolds é descrito na forma da equação (26) (D'ALESSANDRO, V., 2010).

$$\text{Re} = \frac{V_{\infty} 2c}{\nu} \quad (26)$$

Sendo:

Re = número de Reynolds, adimensional

ν = viscosidade cinemática do ar [m²/s]

V_{∞} = velocidade do vento em fluxo livre [m/s]

c = corda da pá [m]

3.3.2 Velocidade de ponta de pá

O coeficiente de potência de um aeromotor define seu rendimento aerodinâmico, ou seja, a capacidade da turbina em transformar a energia cinética do vento em energia mecânica. O coeficiente de potência de um aeromotor varia em função da rotação da turbina e da velocidade do vento (REIS, L. O. M., 2002).

Um fator adimensional que trata da relação entre a velocidade da turbina e a velocidade do vento a qual ela está submetida é chamado de Velocidade de Ponta de Pá (λ) ou TSR, do termo em Inglês Tip Speed Ratio.

A expressão que representa esta relação está descrita em (27):

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (27)$$

Sendo:

λ = velocidade de ponta de pá, adimensional

ω = velocidade angular do aeromotor [rad/s]

V_{∞} = velocidade do vento [m/s]

R = raio do rotor [m]

O gráfico da Figura 14 apresenta três curvas típicas de coeficiente de potência em função da velocidade de ponta de pá (TSR), percebe-se que a velocidade de ponta de pá influencia o valor do coeficiente de potência de cada aeromotor e por consequência em seu desempenho aerodinâmico (BURTON, T., 2001).

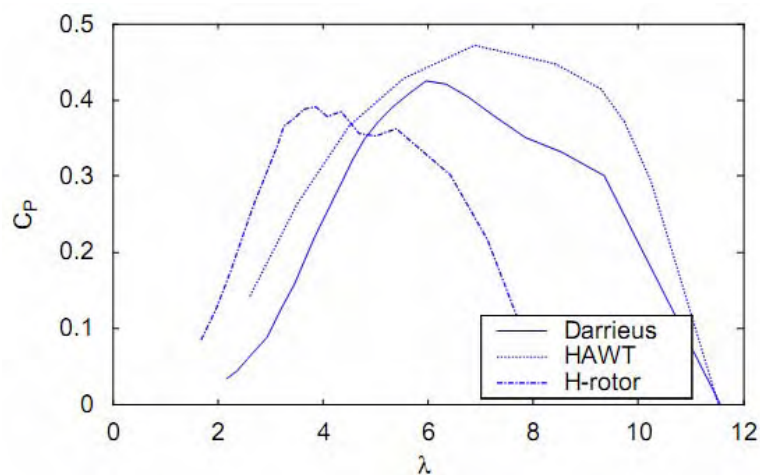


Figura 14 – Coeficiente de potência pela velocidade de ponta de pá (*TSR*) (ERIKSSON, S., 2008)

3.3.3 Solidicidade

A solidicidade é um fator adimensional que determina a relação entre o número de pás do rotor, a corda da pá e o raio do rotor da turbina. Para aeromotores de eixo vertical, tem-se:

$$\sigma = \frac{Bc}{R} \quad (28)$$

Sendo:

σ = solidicidade, adimensional

B = número de pás

c = corda da pá em [m]

R = raio do rotor [m]

Para aeromotores de eixo horizontal, a solidicidade pode ser definida como:

$$\sigma = \frac{Bc}{\pi R} \quad (29)$$

A solidicidade influencia na rotação máxima que um aeromotor é capaz de desenvolver quando submetido a um determinado fluxo de ar (HOWELL, R., 2010).

Está relacionada diretamente com a velocidade de ponta de pá (*TSR*) que o aeromotor pode desenvolver.

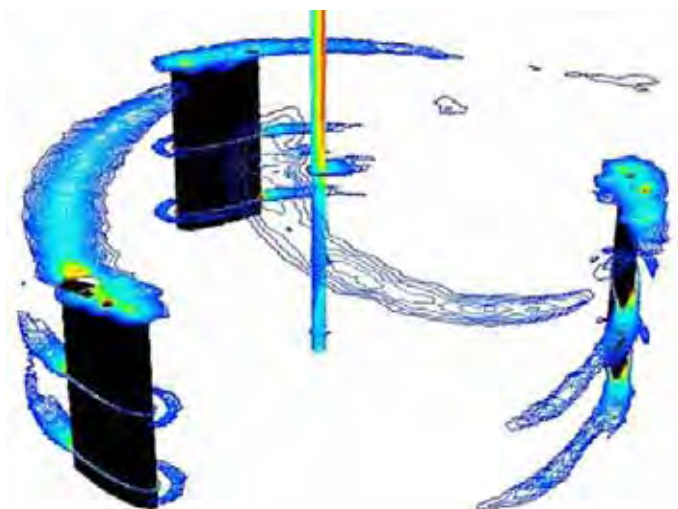


Figura 15 – Esteira aerodinâmica presente em um VAWT em movimento (HOWELL, R., 2010)

Quanto maior a solidicidade de uma turbina, menor será a velocidade de ponta de pá (ERIKSSON, S., 2008), isto ocorre devido aos efeitos da esteira aerodinâmica, como pode ser observado na Figura 15; quanto maior a solidicidade mais a esteira de uma pá influencia a outra causando diminuição da sustentação gerada pelas pás.

A contrapartida de se ter um aeromotor com solidicidade pequena está na resistência das pás, quanto menor for a largura da pá menor será sua resistência mecânica.

3.3.4 Área Varrida

A área varrida de um aeromotor influencia diretamente a potência final que a máquina é capaz de produzir.

Aeromotores de eixo horizontal têm a área varrida calculada conforme a equação (30) (BURTON, T., 2001).

$$A_{Hor} = \pi.R^2 \quad (30)$$

Sendo:

A_{Hor} = área varrida - aeromotores de eixo horizontal [m^2]

R = raio do rotor [m]

Em aeromotores de eixo vertical, porém, a área varrida é uma fração da área do círculo formado pela rotação das pás, isto devido ao fato de que as pás geram torque variável durante os 360° de rotação.

A equação (31) representa matematicamente a área varrida por um aeromotor de eixo vertical, como sendo (BURTON, T., 2001):

$$A_{vert} = \frac{2}{3} \pi \cdot R^2 \quad (31)$$

Sendo:

A_{vert} = área varrida - aeromotores de eixo vertical [m^2]

R = raio do rotor [m]

3.3.5. Torque

O torque e a velocidade que o aeromotor consegue desenvolver influenciam diretamente a potência final desenvolvida pelo equipamento.

Os aeromotores compostos por pás de arrasto, em geral, possuem como principal característica desenvolver alto torque em rotações baixas, onde $\lambda \leq 1$. Isto ocorre pois as pás são impelidas apenas pela força de arrasto do vento incidente e por isso, não desenvolvem velocidades superiores à própria velocidade do vento.

Por outro lado, aeromotores equipados com pás de sustentação, em geral, desenvolvem velocidades mais altas e com $\lambda \geq 1$, devido ao fato das pás serem impelidas pela força de sustentação gerada pela passagem do ar no perfil aerodinâmico.

3.3.5.1 Ângulo de ataque

A velocidade do fluxo de ar a favor e contra o sentido de giro do aeromotor varia de acordo com a posição angular das pás, como pode ser observado na Figura 16. A componente tangencial de velocidade e a normal são, respectivamente, obtidas pelas equações (32) e (33):

$$V_c = R\omega + V_\infty \cos \theta \quad (32)$$

Sendo:

V_c = velocidade tangencial do rotor do aeromotor [m/s]

R = raio do rotor [m]

ω = velocidade angular do rotor [rad/s]

V_∞ = velocidade do vento em fluxo livre [m/s]

θ = ângulo de azimute da turbina [graus]

$$V_n = V_\infty \sin \theta \quad (33)$$

Sendo:

V_n = velocidade normal do rotor do aeromotor [m/s]

Pela Figura 16, observa-se o ângulo de ataque que é dado pela tangente das componentes tangencial e normal da velocidade de vento aparente. Pode ser expresso pela equação (34).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{V_n}{V_c} \right) \quad (34)$$

Sendo:

α = ângulo de ataque das pás [graus]

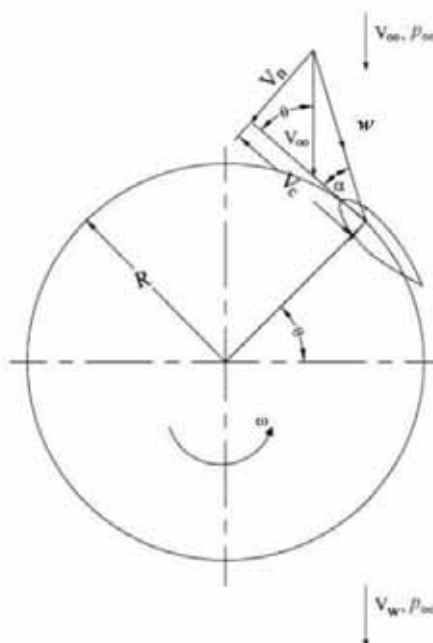


Figura 16 – Velocidades de fluxo presente em um aeromotor de eixo vertical (ISLAM, M., 2008)

3.3.5.2 Variação da velocidade relativa do vento

A variação da velocidade relativa do vento incidente nas pás da turbina pode ser expressa pela equação (35).

$$w = \sqrt{V_c^2 + V_n^2} \quad (35)$$

Sendo:

w = velocidade relativa do vento incidente nas pás do aeromotor [m/s]

V_c = velocidade tangencial do rotor do aeromotor [m/s]

V_n = velocidade normal do rotor do aeromotor [m/s]

O diagrama de forças da Figura 17 mostra um esquema vetorial das forças presentes em uma pá de turbina de um aeromotor de eixo vertical.

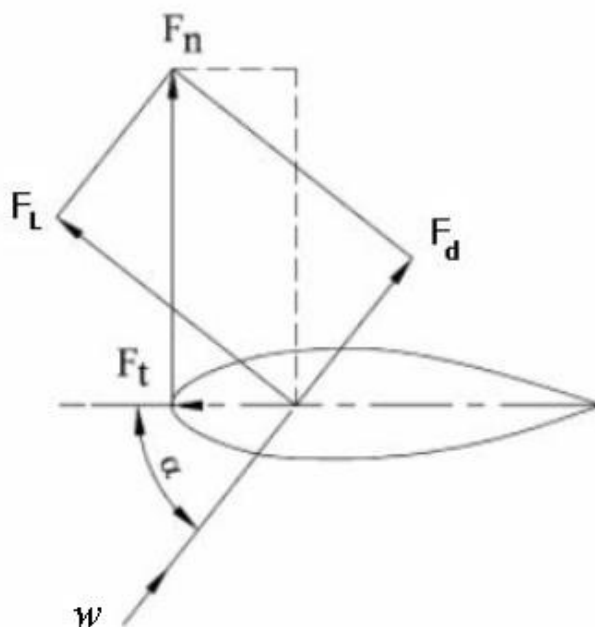


Figura 17 – Diagrama de forças em uma pá de turbina de eixo vertical (ISLAM, M., 2008)

As grandezas que aparecem na Figura 17 e ainda não foram tratadas, são:

F_L = força de sustentação

F_d = força de arrasto

F_n = força normal da pá do aeromotor

F_t = força tangencial da pá do aeromotor

3.3.5.3 Variação das forças normais e tangenciais

A direção da força de sustentação e arrasto e suas componentes normais e tangenciais são mostradas na Figura 17. O coeficiente de força tangencial é a diferença entre a componente tangencial da força de sustentação e arrasto e, o coeficiente de força normal é a diferença entre as componentes normais das forças de sustentação e arrasto. As expressões dos coeficientes das forças tangenciais e normais podem ser escritas, respectivamente, pelas equações (36) e (37).

$$C_t = C_L \operatorname{sen} \alpha - C_d \cos \alpha \quad (36)$$

Sendo:

C_t = coeficiente de força tangencial, adimensional

C_L = coeficiente de sustentação do perfil aerodinâmico da pá, adimensional

C_d = coeficiente de arrasto do perfil aerodinâmico da pá, adimensional

α = ângulo de ataque das pás [graus]

$$C_n = C_L \cos \alpha + C_d \operatorname{sen} \alpha \quad (37)$$

Sendo:

C_n = coeficiente de força normal, adimensional

A força resultante tangencial é definida pela equação (38).

$$F_t = C_t \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot h \cdot w^2 \quad (38)$$

Sendo:

F_t = força tangencial da pá do aeromotor [N]

c = corda da pá [m]

h = altura da pá [m]

A força resultante normal é definida pela equação (39).

$$F_n = C_n \frac{1}{2} \rho \cdot c \cdot h \cdot w^2 \quad (39)$$

Sendo:

F_n = força normal da pá do aeromotor [N]

As forças tangenciais e normais presentes nas pás do aeromotor têm importância quando se necessita dimensionar com precisão os mancais da máquina. Como pode ser visto na Figura 17 elas geram esforços que são sentidos diretamente pelos mancais da máquina.

3.3.5.4 Força de Sustentação

A força de sustentação é a força que impele as pás do aeromotor e está presente sempre que houver vento incidente nas pás. Ela é expressa pela equação (40).

$$F_L = \frac{1}{2} \rho w^2 C_L A_{Superfície} \quad (40)$$

Sendo:

F_L = força de sustentação [N]

C_L = coeficiente de sustentação do perfil aerodinâmico das pás, adimensional

$A_{Superfície}$ = área da superfície da pá [m^2]

3.3.5.5 Força de Arrasto

A força de arrasto está presente nas pás do aeromotor sempre que houver vento incidente nas pás. A força de arrasto é expressa pela equação (41).

$$F_d = \frac{1}{2} \rho w^2 C_d A_{Superficie} \quad (41)$$

Sendo:

F_d = força de arrasto [N]

C_d = coeficiente de arrasto do perfil aerodinâmico das pás, adimensional

3.3.5.6 Cálculo do Torque

O torque total presente no eixo do aeromotor é resultado da somatória das componentes horizontais das forças de sustentação e arrasto presentes nas pás do aeromotor, quando da existência de vento incidente, multiplicado pelo raio do rotor e pelo número total de pás presentes no rotor.

A Figura 18 apresenta o diagrama de forças presente numa pá do aeromotor de eixo vertical mostrando as componentes horizontais da força de sustentação e da força de arrasto.

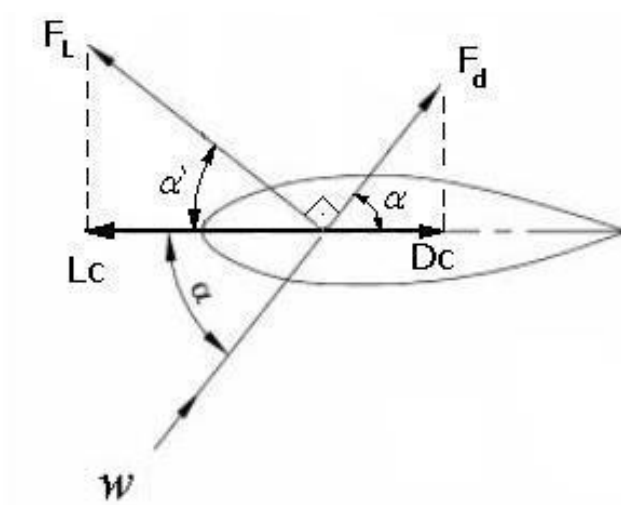


Figura 18 – Diagrama de forças resultantes em uma pá de turbina de eixo vertical

As componentes horizontais das forças de sustentação e de arrasto são determinadas pelas equações (42) e (43), respectivamente.

$$Lc = F_L \cos \alpha' \quad (42)$$

$$Dc = F_d \cos \alpha \quad (43)$$

Sendo:

Lc = componente horizontal da força de sustentação (F_L) [N]

Dc = componente horizontal da força de arrasto (F_d) [N]

O ângulo α' é determinado pela equação (44).

$$\alpha' = 180 - (90 + \alpha) \quad (44)$$

Sendo:

α' = ângulo de ataque complementar [graus]

A equação (45) mostra matematicamente a expressão que determina o torque total no eixo.

$$T_t = (Lc - Dc)R.B \quad (45)$$

Sendo:

T_t = torque total no eixo do aeromotor [N.m]

R = raio do rotor [m]

B = número de pás do aeromotor

3.3.6 Modificação do perfil aerodinâmico das pás

Uma técnica utilizada para melhorar o desempenho aerodinâmico das pás de um aeromotor, buscando propriedades particulares como aumento de sustentação ou deslocamento do ponto de geração de sustentação, dá-se através da alteração do perfil aerodinâmico utilizado na construção das pás.

Os perfis pertencentes à série de quatro dígitos NACA estão entre os mais utilizados para construção das pás, pois, além de apresentarem simples construção, trazem bom desempenho aerodinâmico às máquinas.

Os perfis NACA da série quatro dígitos têm a nomenclatura NACAXYZZ-KW, onde:

- O primeiro dígito à esquerda (X) descreve o máximo câmber como percentual da corda;
- O segundo dígito (Y) descreve a distância do máximo câmber do bordo de ataque do aerofólio em décimos de percentual da corda;
- O terceiro e quarto dígitos (ZZ) descrevem a espessura do perfil em percentual da corda.

Os perfis modificados possuem em sua nomenclatura dois dígitos extras separados por hífen, onde:

- O primeiro dígito à esquerda (K) descreve a circunferência do bordo de ataque com 0 sendo agudo, 6 a circunferência do perfil padrão em números maiores que 6 indicando raio de circunferência maiores que os do perfil padrão;
- O segundo dígito (W) indica a distância do bordo de ataque até a espessura máxima do perfil em décimos de percentual da corda.

O câmber de um aerofólio é a curvatura do perfil aerodinâmico e a corda é à distância entre o bordo de ataque e o bordo de fuga do perfil (PRADINES, L., 2004).

3.3.7 Variação da densidade do ar com a altitude

A densidade do ar varia de forma inversa ao aumento de altitude. Devido a este fato, quanto mais alto for o local de instalação de um aeromotor, menor será a potência final desenvolvida.

A equação (46) descreve como esta variação de densidade ocorre como o aumento de altitude.

Esta equação é válida para altitudes iguais ou inferiores a 11.000 metros acima do nível do mar, de acordo com a ISA (FAA, 2012).

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T_0 + \nabla z}{T_0} \right)^{\frac{g}{R_{\text{gás}} \nabla} - 1} \quad (46)$$

Sendo:

ρ = densidade do ar no local da instalação do aeromotor [kg/m^3]

ρ_0 = densidade do ar ao nível do mar [kg/m^3]

T_0 = temperatura do ar ambiente [K]

∇ = gradiente térmico = $-6,5 \cdot 10^{-3}$ [K / m]

z = altitude do local de instalação em relação ao nível do mar [m]

g = aceleração da gravidade = $9,8$ [m/s^2]

$R_{\text{gás}}$ = constante dos gases perfeitos = 287 [$m^2/s^2 K$]

3.3.8 Temperatura do ar

A temperatura é uma medida da energia cinética média das moléculas. Se a temperatura do ar sobe, suas moléculas apresentam maior movimento. Se o ar for aquecido num recipiente fechado, sua pressão sobre as paredes internas aumentará, à medida que moléculas com mais energia bombardearem as paredes com mais força. A densidade do ar não se alterará. A atmosfera, contudo, não é confinada, de modo que o ar é livre para expandir-se ou contrair-se. A sua densidade, portanto, é variável.

Quando o ar é aquecido, o espaçamento entre moléculas aumenta e a densidade diminui, acarretando queda de pressão, pois para volumes iguais o ar quente é mais leve que o ar frio.

A Tabela 1 apresenta os valores de densidade do ar para determinadas temperaturas ao nível do mar.

TABELA 1 – Densidade do ar ao nível do mar (FAA, 2012)

Temperatura (°C)	Densidade do ar (kg/m ³)
-10	1,342
-5	1,316
0	1,293
5	1,269
10	1,247
15	1,225
20	1,204
25	1,184
30	1,165

3.3.9 Umidade do ar

Umidade é a quantidade de vapor de água no ar. A quantidade máxima de vapor que o ar pode absorver varia com a temperatura. Quanto mais elevada for a temperatura do ar, mais vapor de água ele pode absorver.

A maior presença de vapor d'água no ar diminui a densidade do ar porque o peso molecular do vapor de água (18,016 kg/mol) é menor que o peso molecular médio do ar (28,97 kg/mol). Portanto, em iguais temperaturas e volumes, uma massa de ar mais úmida exerce menos pressão que uma massa de ar mais seca.

Por essa razão, a sustentação máxima desenvolvida por um perfil aerodinâmico diminui com o aumento da umidade relativa do ar.

4. PROJETO DO AEROMOTOR DE EIXO VERTICAL

4.1 Objetivos gerais do projeto

Desenvolver um aeromotor de baixo custo para ser instalado em regiões urbanas com presença de anteparos nas proximidades.

4.2 Estratégias gerais do projeto

Foi considerado inicialmente o nível de ventos presentes no local de instalação. Para isso, dados históricos da velocidade média dos ventos locais são considerados.

Baseado nos valores de velocidade média dos ventos presentes foi selecionado o tipo de aeromotor mais adequado para o local, entre as opções de eixo horizontal e eixo vertical. Esta seleção leva em consideração fatores como desempenho teórico no local de instalação, simplicidade de construção e manutenção e conseqüentemente o custo estimado do aeromotor.

O projeto da torre não é detalhado neste trabalho visto que foi utilizada uma peça comercialmente disponível para este tipo de aplicação.

4.3 Local de instalação

O aeromotor está instalado no Centro de Energias Renováveis no campus da UNESP em Guaratinguetá, São Paulo.

4.4 Características físicas do local de instalação

O Centro de Energias Renováveis está localizado em uma área repleta de anteparos em um raio inferior a cinco metros do local de instalação do aeromotor. Além de anteparos como árvores e arbustos, existem prédios situados a distâncias menores que 15 metros do local de instalação.

A Figura 19 mostra o local de instalação do aeromotor, onde se observam os diversos tipos de anteparos existentes nas proximidades.

Com base nas principais características dos aeromotores de eixo horizontal (bom desempenho com vento sem turbulência, instalação em torres altas, gerador na nacela) e de eixo vertical (bom desempenho em vento turbulento, simplicidade de construção, gerador no nível do solo), acredita-se que um aeromotor de eixo vertical é a opção que traz mais vantagens, considerando-se o local de instalação.



Figura 19 – Local de instalação do aeromotor e presença de anteparos

4.5 O vento no local de instalação

As velocidades médias mensais de ventos presentes no local de instalação não superam 4 m/s, sendo que a velocidade média anual situa-se em 3,405 m/s. Valores de velocidades de vento inferiores a 4 m/s são consideradas baixas para a instalação de aeromotores (CRESESB, 2012), e exige que o projeto considere baixas velocidades de partida para a máquina, bem como tenha a capacidade de trabalhar em regime com valores baixos de velocidade de vento.

O gráfico da Figura 20 mostra a velocidade média do vento em m/s referentes ao período de 1974 a 2000 (MOURA, L. F. S, 2010).

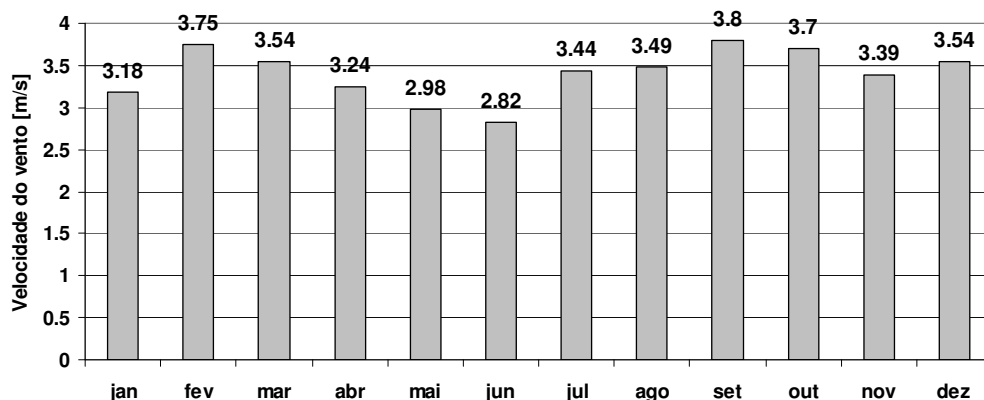


Figura 20 – Velocidade mensal do vento em Guaratinguetá-SP de 1974-2000 (MOURA, L. F. S., 2010)

4.6 Definição da orientação do eixo do aeromotor

Alguns fatores influenciaram diretamente a seleção da orientação do eixo do aeromotor, tais como:

- 1) Intensidade e frequência dos ventos no local de instalação;
- 2) A presença de anteparos no local de instalação e sua proximidade do aeromotor;
- 3) A altura possível da torre no local de instalação;
- 4) A área disponível para instalação.

Outros fatores listados a seguir influenciam indiretamente na seleção, são eles:

- 1) Verba disponível para execução do projeto;
- 2) Facilidade de manutenção.

Levando-se em consideração que:

- 1) No local de instalação existem diversos anteparos próximos do aeromotor;
- 2) A velocidade média dos ventos varia de 2,82 m/s a 3,8 m/s;
- 3) A direção dos ventos varia sensivelmente devido aos anteparos;
- 4) A altura da torre de 6 m, devido a limitações orçamentárias;
- 5) A simplicidade de construção e manutenção são premissas do projeto.

A seleção recai naturalmente sobre os aeromotores de eixo vertical, pois possuem características que atendem as necessidades listadas acima.

4.7 Definição do tipo e número de pás do rotor

Duas opções de pás são levadas em consideração nesta seleção, são elas:

- 1) Pás de arrasto;
- 2) Pás de sustentação.

Os rotores que possuem uma ou duas pás estão sujeitos a grandes desbalanceamentos dinâmicos exigindo pás e eixos de transmissão mais robustos para suportar futuros efeitos de fadiga no material (BURTON, T., 2001) (ERIKSSON, S., 2008). Este fato trás como consequência imediata o aumento de custo do projeto final e aumento de peso, além disso, rotores de eixo vertical com duas pás de sustentação não conseguem partir sem auxílio externo, mesmo que haja vento no local (ERIKSSON, S., 2008) (WAHL, M., 2007) (VILLAR Alé, J. A., 2007).

Como o local de instalação possui diversos anteparos, existe uma resistência natural ao início do movimento, pois a direção do vento muda constantemente devido à turbulência.

As pás de arrasto, por possuírem características de gerar alto torque com baixas velocidades de vento, têm facilidade maior de iniciar o movimento em situações de vento turbulento e têm como contra partida um desempenho limitado quando em regime. Já as de sustentação entregam mais desempenho mesmo em situações de vento turbulento, mas podem necessitar de um impulso externo para iniciar o movimento.

Isto posto, a escolha recai sobre as pás de sustentação pelo desempenho que entregam, mas um sistema adicional deve ser considerado para garantir partidas em baixas velocidades de vento.

Através da revisão bibliográfica buscou-se alternativas simples para se desenvolver um sistema capaz de iniciar o movimento do eixo sem causar prejuízos ao desempenho do equipamento e que fosse de baixo custo de construção. Ao final deste estudo nenhum sistema que satisfizesse estes requisitos foi encontrado, logo outra

solução foi então considerada. A solução que mais se aproxima das necessidades expostas foi encontrada quando se considerou a possibilidade de modificar aerodinamicamente as pás para que apresentassem características de gerar sustentação submetida a baixas velocidades de vento; foi então determinado que slots seriam adicionados às pás a fim de cumprir este papel. Os slots geram um arrasto aerodinâmico durante o início do movimento do aeromotor a fim de permitir que o equipamento inicie um movimento de rotação com baixas velocidades de vento incidente.

Dentre as opções de aeromotores compostos por pás de sustentação dois tipos foram levados em consideração na seleção, os de pás com perfil aerodinâmico variável, também conhecido como Darrieus, e os de pás com perfil aerodinâmico constante, também chamado de rotor H.

As pás de perfil aerodinâmico variável são de construção difícil e necessitam de um estudo aerodinâmico mais apurado para se obter um desempenho satisfatório, além de ter implicações no aumento de custo, por outro lado as de perfil aerodinâmico constante são bem mais simples de serem construídas e de custo reduzido.

A seleção final recai sobre pás de sustentação, com perfil aerodinâmico constante, num rotor composto por três pás. Além disso, uma abertura traseira será adicionada para baixar a velocidade de partida.

4.7.1 Definição do perfil aerodinâmico das pás

Os perfis aerodinâmicos NACA são amplamente utilizados na construção de pás com perfil constante. Dentre os perfis mais utilizados estão os simétricos da série 4 dígitos (ERIKSSON, S., 2008) (WAHL, M., 2007) (CLAESSENS, M. C., 2006).

Um dos perfis simétricos mais utilizados é o NACA 0018, diversos aeromotores desenvolvidos com pás com este perfil demonstraram desempenho favorável (HOWELL, R., 2010) (WAHL, M., 2007).

Devido à baixa velocidade de vento local, tem-se a necessidade de se utilizar um perfil que se adeque ao local de instalação.

A partir das referências encontradas na bibliografia e considerando a comprovada eficiência do perfil NACA 0018, ele foi escolhido como base para um estudo onde modificações aerodinâmicas foram introduzidas e fim de melhorar as características de sustentação do perfil padrão. O software Design Foil (DREESECODE, 2011) foi utilizado para fazer esta análise. O número de Reynolds é calculado a partir da equação (26), para a velocidade média de vento anual de Guaratinguetá.

Sendo:

ν = viscosidade cinemática do ar = $1,51 \cdot 10^{-5}$ m²/s

V_{∞} = velocidade do vento em fluxo livre = 3,405 m/s

c = corda da pá = 0,3 m

$$Re = \frac{V_{\infty} 2c}{\nu} = 278266 \quad (47)$$

No software Design Foil, baseado no número de Reynolds calculado, foi estudado uma modificação no perfil NACA 0018 que trouxesse aumento de sustentação, buscando como efeito o aumento de torque no eixo do aeromotor, porém sem aumentar o arrasto na mesma proporção.

O perfil selecionado foi o NACA 0018-53, que possui um bordo de ataque mais afilado que o perfil padrão (NACA 0018-63).

O gráfico da Figura 21 mostra uma curva comparativa do coeficiente de sustentação do perfil escolhido com o padrão.

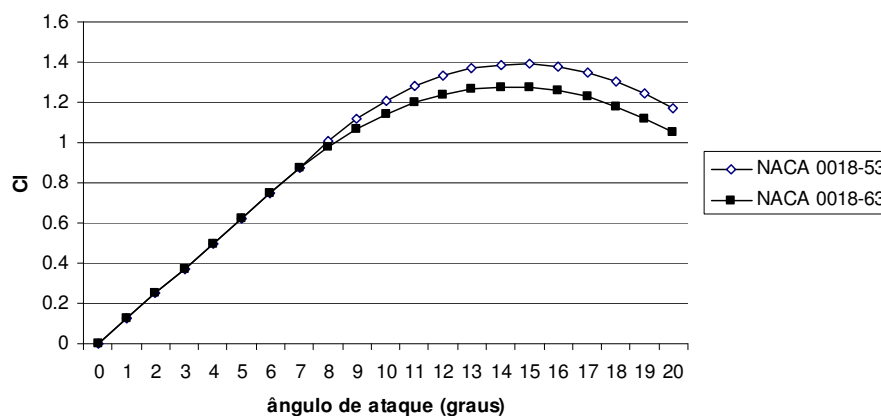


Figura 21 – Comparativo dos coeficientes de sustentação (C_L) (Rey = 278266)

O gráfico da Figura 22 mostra um comparativo do coeficiente de arrasto do perfil padrão em comparação com o perfil modificado.

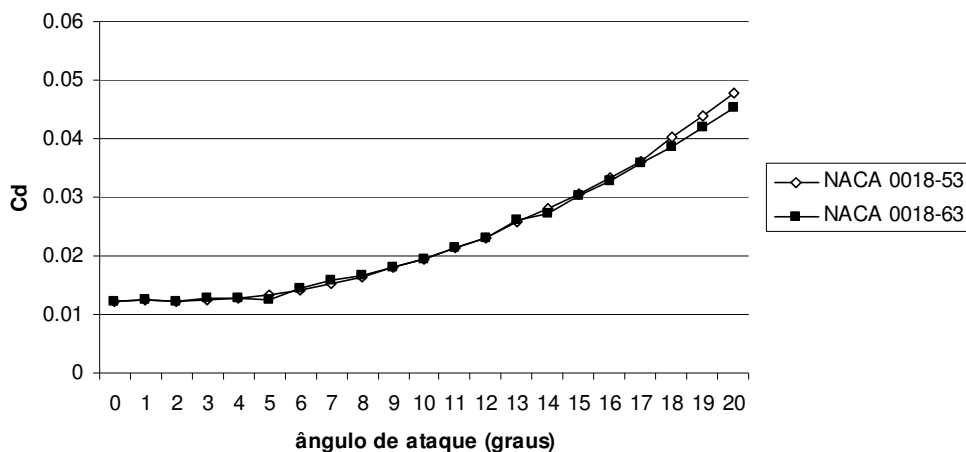


Figura 22 – Comparativo dos coeficientes de arrasto (C_d) ($Re_y = 278266$)

Através de uma análise dos gráficos das Figuras 21 e 22, percebe-se que o perfil NACA 0018-53 desenvolve um coeficiente de sustentação igual ao do perfil padrão NACA 0018-63 até o ângulo de ataque $\alpha = 7^\circ$, a partir daí o perfil modificado passa a apresentar um coeficiente de sustentação maior que o do perfil padrão, atingindo 11% a mais que o perfil padrão para um ângulo de ataque $\alpha = 20^\circ$.

Com relação ao arrasto, uma análise mostra que o perfil modificado e o padrão apresentam valores similares até o ângulo de ataque $\alpha = 13^\circ$, a partir daí o perfil modificado apresenta maiores valores de arrasto que os do perfil padrão, porém atinge o máximo valor percentual de 5% com o ângulo de ataque $\alpha = 20^\circ$.

4.7.2 Determinação das dimensões das pás

As dimensões das pás têm influência direta no desempenho do aeromotor alterando parâmetros como velocidade final e o rendimento aerodinâmico da máquina como um todo.

O melhor desempenho de um rotor de três pás com perfil aerodinâmico constante se dá com solidicidade variando entre 0,3 a 0,6 (WAHL, M., 2007), logo, devido ao fato de que as pás foram construídas em chapa de alumínio, o que limita a confecção

de peças muito pequenas devido ao pequeno raio de curvatura dos perfis aerodinâmicos, a solidicidade de 0,6 será adotada.

A altura das pás de 2 m foi escolhida baseada no fato de que as chapas comercialmente disponíveis têm esta largura o que abaixa consideravelmente os custos de construção.

Então, da equação (28), que define a solidicidade para aeromotores de eixo vertical, tem-se:

c = corda da pá [m]

σ = solidicidade, adimensional = 0,6 (adotada)

B = número de pás = 3

R = raio do rotor = 1,5 m

$$c = \frac{\sigma \cdot R}{B} = 0,3 \text{ m} \quad (48)$$

Logo, as dimensões finais das pás serão:

h = altura da pá = 2 m

c = corda da pá = 0,3 m

4.7.3 Determinação das dimensões do slot

O comprimento do slot traseiro das pás visto na Figura 23 foi determinado levando-se em consideração o ponto onde o fluxo de ar que passa pelo perfil aerodinâmico se descola do perfil quando as pás estiverem em movimento constante e com ângulo de ataque de 20°, a largura é consequência da distância entre o bordo de fuga e o término da fenda do slot.

A presença do slot não causa um arrasto significativo às pás quando em movimento, embora esta percepção se baseie em uma análise qualitativa dos gráficos obtidos no software Design Foil (DREESECODE, 2011). Para uma análise

quantitativa dos resultados e perdas por arrasto, seria necessário um software capaz de simular o escoamento tridimensional na superfície.

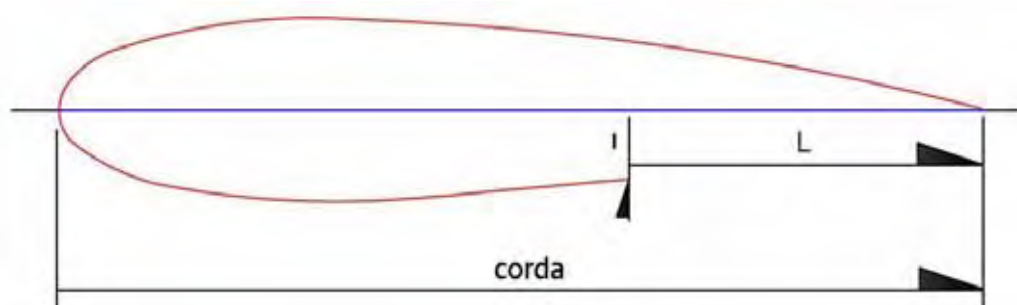


Figura 23 – Perfil NACA 0018-53 com *slot* traseiro

Nos gráficos da Figura 24 é possível observar o ponto onde o escoamento se descola do perfil aerodinâmico das pás. No esquema da esquerda com ângulo de ataque $+20^\circ$ observa-se que a linha de fluxo aerodinâmico passa rente ao perfil na região do slot e, pela análise do software Design Foil não se nota nenhum ponto de grande turbulência. O mesmo efeito aerodinâmico ocorre na figura central com ângulo de ataque igual a 0° . Já na Figura da direita com ângulo de ataque negativo à linha de fluxo se descola do perfil antes mesmo de passar pela região do slot o que corrobora para se afirmar que o slot não gera arrasto adicional significativo.



Figura 24 – Linha de fluxo no perfil NACA 0018-53 ($Re = 278266$) (*Design Foil*)

A Figura 25 mostra uma pá do aeromotor, onde se observa a presença do slot traseiro indicado pelas setas.

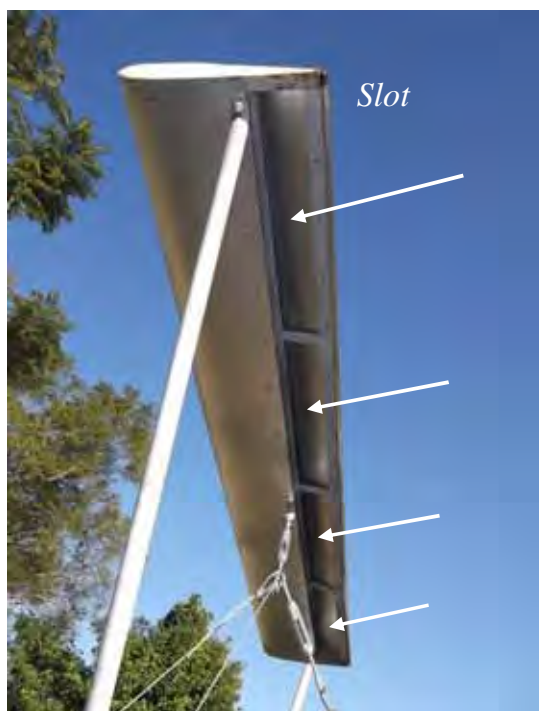


Figura 25 – Pá do aeromotor e *slot* traseiro

4.8 Eixo de transmissão

O eixo de transmissão utilizado no aeromotor é fabricado com um tubo de 2 polegadas de diâmetro, em aço, com parede de 1,7 mm.

Na parte superior o eixo tem acoplado, através de parafusos, as três pás do aeromotor e na parte inferior foi instalado um terminal de 1 polegada de diâmetro fabricado em aço para servir de ponto de instalação das rodas dentadas da transmissão.

A Figura 26 mostra o eixo de transmissão.



Figura 26 – Eixo de transmissão instalado na torre

Dois rolamentos de esferas suportam o eixo através de mancais instalados na torre do aeromotor, um na parte superior e outro na parte inferior do eixo. A Figura 27 mostra o mancal inferior e o terminal para acoplamento da roda dentada.



Figura 27 – Eixo de transmissão: Mancal inferior e terminal de acoplamento

4.9 Redutor de velocidades

O redutor de velocidades é composto por um jogo de pinhões e coroas conectadas por corrente de aço instalado no terminal do eixo de transmissão do

aeromotor. Este conjunto redutor foi acoplado com a finalidade de aumentar o valor do torque final e assim, facilitar as medições de torque no eixo.

O conjunto instalado tem a relação de transmissão de 6,25:1. A Figura 28 mostra o redutor instalado na saída do eixo do aeromotor.



Figura 28 – Redutor de velocidades instalado no eixo do aeromotor

A Figura 29 mostra um esquemático do redutor de velocidades com as coroas e pinhões e seu respectivo número de dentes.

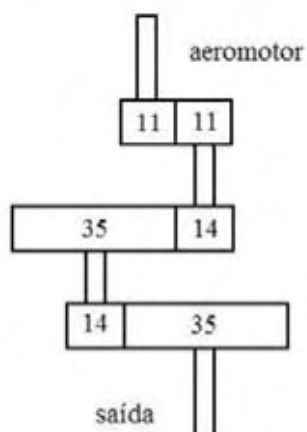


Figura 29 – Esquema do redutor de velocidades (relação: 6,25:1)

4.10 Descrição e dimensões finais do aeromotor

4.10.1 Descrição

O aeromotor de eixo vertical possui um rotor tipo H que é composto por três pás com perfil aerodinâmico constante NACA 0018-53 e slot traseiro, com três metros de diâmetro. As pás foram fabricadas com alma em aço e revestimento em chapa de alumínio.

O eixo de transmissão é fabricado em aço, suportado por dois mancais de rolamentos de esferas.

O redutor de velocidades acoplado à saída do eixo de transmissão é composto por um jogo de pinhões e coroas conectadas por corrente de aço e tem razão de redução de 6,25:1.

A torre de sustentação possui seis metros de altura, é fabricada em aço e é fixada por três parafusos em uma base de concreto construída no solo. Três cabos de aço com esticadores estão instalados na lateral da torre a fim de aumentar a resistência do conjunto às intempéries.

4.10.2 Dimensões finais do aeromotor

A Figura 30 mostra o aeromotor de eixo vertical e suas principais dimensões.

A Figura 31 mostra uma visão geral do equipamento instalado.

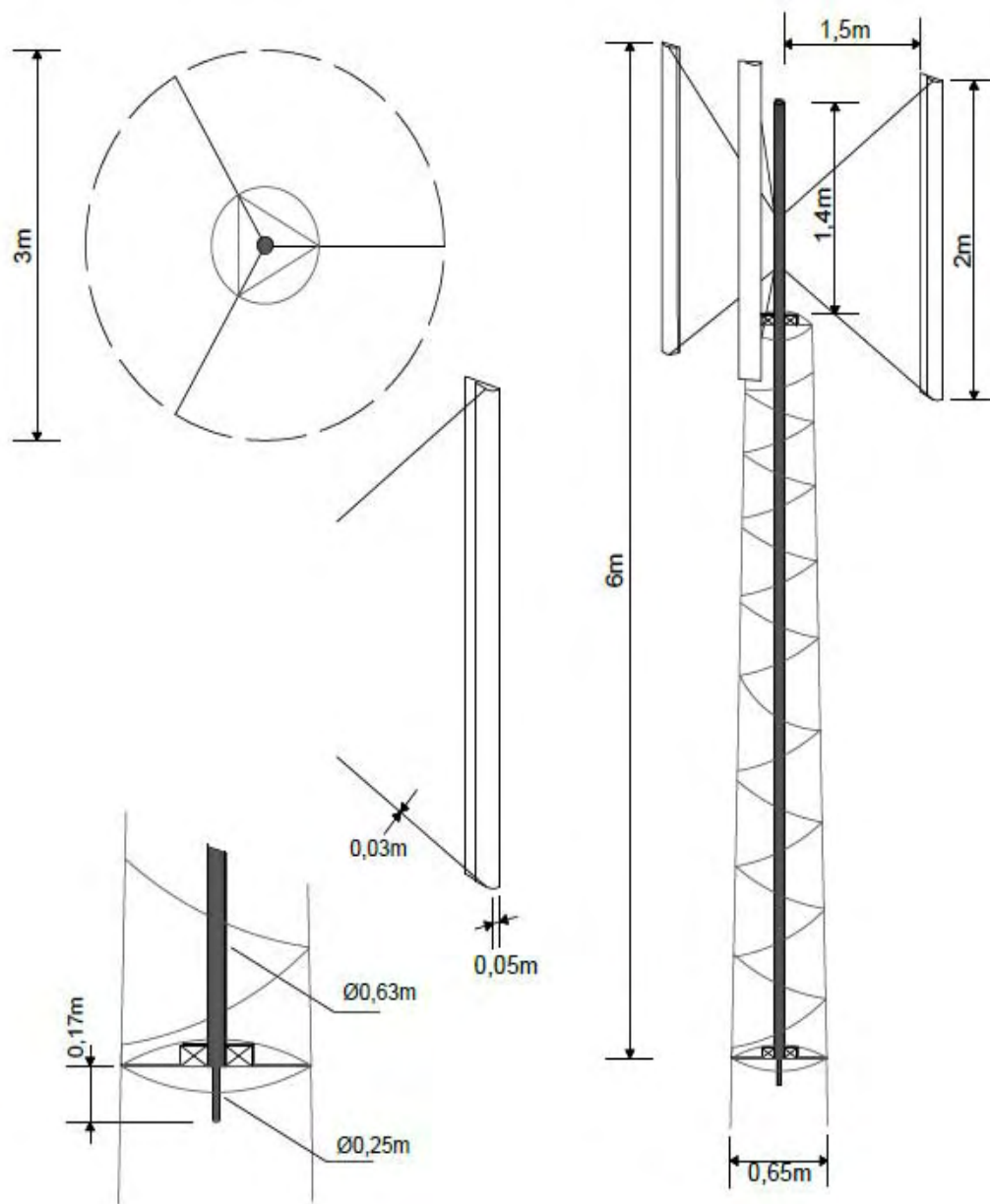


Figura 30 – Aeromotor de eixo vertical – Dimensões principais



Figura 31 – Aeromotor de eixo vertical – Vista geral

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Experimentos utilizando o aeromotor de eixo vertical

Os experimentos utilizando o aeromotor desenvolvido neste trabalho foram realizados entre os meses de julho a outubro de 2012 em período diurno, das 8:00h às 17:00h. Estes meses foram escolhidos devido a maior incidência e velocidade de ventos, de acordo com o gráfico da Figura 20.

Foram realizadas medições de velocidade do vento, temperatura ambiente, umidade relativa do ar, rotação do eixo do aeromotor, velocidade de partida do aeromotor e torque na saída do redutor.

Com os dados medidos foi possível determinar a relação entre a velocidade do vento incidente e a rotação desenvolvida pelo aeromotor e num segundo experimento calcular o valor teórico de torque que estaria disponível no eixo do aeromotor e comparar com os valores práticos medidos.

Com exceção da velocidade de partida do aeromotor, todas as medições foram realizadas com o equipamento em velocidade constante; rajadas e vento de curta duração, que causavam movimento não constante do aeromotor, foram desconsideradas para a coleta de dados.

Para a velocidade de partida foi considerada a transição da imobilidade para um movimento angular que pudesse ser medido pelo tacômetro como sendo a velocidade de leitura.

Foi determinada então a velocidade de partida através de uma média simples das velocidades de vento medidas em diversas situações onde o aeromotor saiu da imobilidade para um movimento angular mensurável pelo tacômetro, sempre com velocidades de vento variando entre 1 m/s a 2 m/s.

Foram levantados gráficos mostrando a relação entre velocidade de vento e rotação do eixo do aeromotor em vazio, sem nenhuma carga instalada.

Foi medido o valor do torque na saída do redutor de velocidades e diretamente no eixo do aeromotor.

A potência foi calculada utilizando o valor de torque medido no redutor de velocidades ou no eixo multiplicada pela velocidade angular do eixo no momento da medição.

O coeficiente de potência foi determinado baseado no valor de potência calculado e torque medido.

5.2 Medição de rotação do eixo do aeromotor, velocidade do vento e parâmetros atmosféricos

Utilizando um anemômetro digital a uma distância de aproximadamente 3 metros do eixo do aeromotor e a uma altura de 2 metros tomaram-se as medições de velocidade do vento incidente no aeromotor. A Figura 32 apresenta o anemômetro utilizado durante as medições.



Figura 32 – Anemômetro digital

A Tabela 2 mostra as especificações do anemômetro digital utilizado.

TABELA 2 – Dados técnicos do anemômetro digital

Descrição	Precisão	Faixa de Medição
Anemômetro digital		
Modelo 477	$\leq 20\text{m/s: } \pm 3\%$	0,4 ~ 30,0 m/s
	$> 20\text{m/s: } \pm 4\%$	
Fabricante: HOMIS		

A rotação do eixo foi medida com um tacômetro digital posicionado perpendicular ao eixo do aeromotor. A Figura 33 apresenta o tacômetro utilizado.



Figura 33 – Tacômetro digital

A especificação do tacômetro utilizado é mostrada na Tabela 3.

TABELA 3 – Dados técnicos do tacômetro digital

Descrição	Precisão	Faixa de Medição
Tacômetro digital		
TD-812	$\pm 0,05\%$	2,5 a 99999 RPM
Fabricante:		
Instrutherm		

A Figura 34 mostra uma foto do eixo do aeromotor onde se vê duas fileiras de adesivos reflexivos onde o tacômetro foi posicionado manualmente para medição de RPM.



Figura 34 – Pontos de medição de rotações por minuto no eixo do aeromotor

Um Termo-Higro-Anemômetro Barômetro foi utilizado para medições de temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade do ar. A Figura 35 mostra o equipamento utilizado.



Figura 35 – Termo-Higro-Anemômetro Barômetro digital

A Tabela 4 mostra as especificações do Termo-Higro-Anemômetro Barômetro digital utilizado.

TABELA 4 – Dados técnicos do Termo-Higro-Anemômetro Barômetro digital

Descrição	Precisão	Faixa de Medição
Termo-Higro-Anemômetro Barômetro digital	0,8°C	Temperatura: 0°C a 50°C Resolução: 0,1°C
Modelo THAB-500	3% da leitura	Umidade: 10 a 95% Resolução: 0,1%
Fabricante: INSTRUTHERM	2% + 0,2 m/s	Velocidade do ar: 0,9 a 35,0 m/s Resolução: 0,1 m/s
	1,2 mmHg	Pressão atmosférica: 7,5 a 825,0 mmHg Resolução: 0,1 mmHg

No período de medições (julho a outubro de 2012) foram executados 65 medições e foram observadas velocidades de vento de 1,4 m/s até 7 m/s, e uma velocidade média do vento no período das medições de 3,85 m/s.

A Tabela 5 apresenta uma amostragem dos valores medidos neste experimento.

TABELA 5 – Amostragem das medições de velocidade do vento e rotação do eixo

Data	Hora	Temp C°	Umidade%	Veloc. Vento m/s	RPM eixo	Veloc. Partida m/s
12-Jul	16:00	18,4	85,9	2,9	18,46	-
24-Jul	14:35	24,1	62,4	1,4	5,4	1,4
26-Jul	17:20	22,2	71,2	3,6	22,64	-

5.2.1 Medição da velocidade do eixo

Como descrito anteriormente, 65 medições de velocidade de vento e rotação do eixo em vazio foram feitas com o intuito de determinar uma curva com a relação entre estas variáveis.

Foram levantados dados com velocidade de vento variando entre 1,4 m/s a 7 m/s.

Traçando-se um gráfico com os pontos medidos e os erros do anemômetro, tem-se a composição observada na Figura 36.

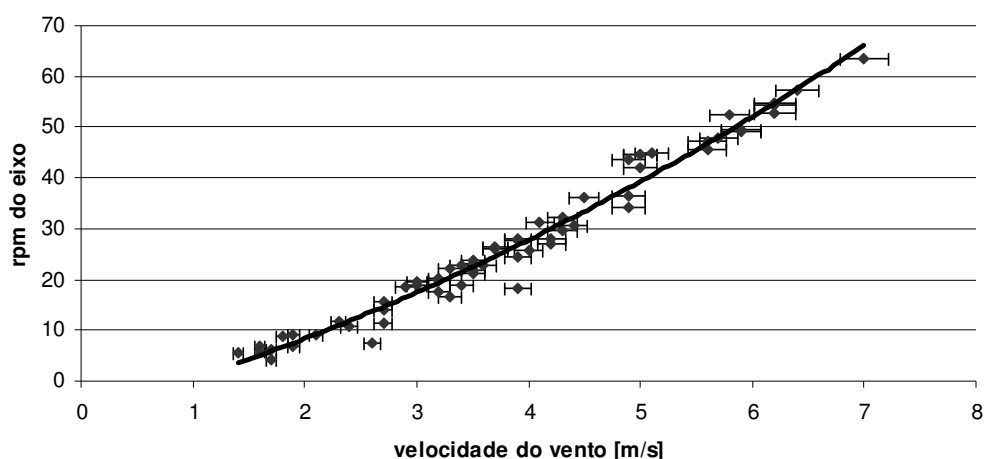


Figura 36 – RPM do eixo em vazio em relação à velocidade de vento incidente

A velocidade do aeromotor aumentou à medida que a velocidade do vento incidente aumentava e não se observou nenhum ponto de inflexão, ou seja, não se atingiu a velocidade máxima que o equipamento pode desenvolver. O valor mínimo de velocidade de vento para o qual houve movimento do aeromotor foi de 1,4 m/s, que gerou uma rotação no eixo de 5,38 rpm; o maior valor de vento registrado foi de 7 m/s fazendo o aeromotor girar a 63,48 rpm.

Observa-se também que o aumento da velocidade do eixo não é proporcional ao aumento da velocidade do vento, que pode ser explicado olhando a equação (40) que define a força de sustentação. Nesta equação a velocidade do vento aparente é elevada ao quadrado, ou seja, a força de sustentação presente nas pás aumenta exponencialmente à medida que a velocidade do vento aumenta linearmente. Isto explica o comportamento da curva do gráfico da Figura 36.

5.2.2 Cálculo da velocidade de ponta de pá - *TSR*

O cálculo da velocidade de ponta de pá é feito com base nas medições de rotações por minuto do eixo do aeromotor.

A frequência deve ser determinada dividindo-se o número de rotações por minuto por 60, obtido pela expressão (49).

$$f = \frac{rpm}{60} \quad (49)$$

Sendo:

f = frequência [Hz]

rpm = rotações por minuto

A velocidade linear das pás deve ser calculada a fim de ser comparada com a velocidade do vento incidente para determinação da velocidade de ponta de pá, para isso se utiliza a equação (50).

$$v_{Linear} = 2\pi \cdot f \cdot R \quad (50)$$

Sendo:

v_{Linear} = velocidade linear da pá [m/s]

Utilizando-se a expressão (49) calculou-se a frequência para cada um dos 65 pontos de medição de rotações por minuto.

Feito o cálculo da velocidade linear das pás, pode-se determinar a velocidade de ponta de pá através da expressão (27), onde:

ω = velocidade angular em rad/s

A expressão (51) mostra a relação entre a velocidade angular e a velocidade linear.

$$\omega = \frac{v_{Linear}}{R} \quad (51)$$

Substituindo-se a expressão (51) na (27) obtém-se:

$$\lambda = \frac{\frac{v_{Linear}}{R} R}{V_{\infty}} \quad (52a)$$

$$\lambda = \frac{v_{Linear}}{V_{\infty}} \quad (52b)$$

Então, o cálculo da velocidade de ponta de pá é feito utilizando-se a expressão (52b), substituindo-se o valor de velocidade linear e da velocidade do fluxo de ar em fluxo livre.

O cálculo de velocidade de ponta de pá foi feito para cada um dos pontos de rotação por minuto medidos no eixo do aeromotor. O gráfico da Figura 37 apresenta a curva gerada pelos pontos medidos.

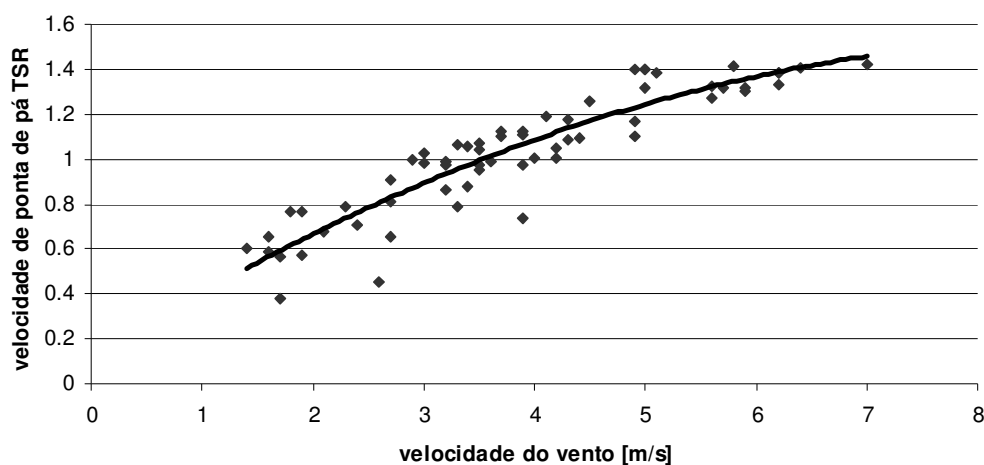


Figura 37 – TSR em vazio em relação à velocidade de vento incidente

Observa-se no gráfico da Figura 36 que não existe um ponto de inflexão, ou seja, o limite de velocidade de ponta de pá possível de ser atingido pelo equipamento não foi alcançado.

Os valores de velocidade de ponta de pá superiores a 1 indicam que o rotor foi impelido somente pela força de sustentação gerada pelo perfil aerodinâmico das pás, já valores inferiores a 1 indicam que o rotor é impelido pela ação das forças de arrasto geradas pela presença do *slot* nas pás e pela força de sustentação.

5.2.3 Mediação da velocidade de partida

A velocidade de partida do aeromotor foi determinada observando-se os menores valores de velocidade de vento que resultaram em movimento constante do aeromotor. Estes valores foram levantados com base nas medições de velocidades de vento e rotações do eixo do aeromotor.

A Figura 38 mostra os valores de rotação do eixo para valores de velocidade de vento entre 1 m/s e 2 m/s, com os erros do anemômetro, que foram os menores valores de velocidade de vento que tiraram o aeromotor da inércia.

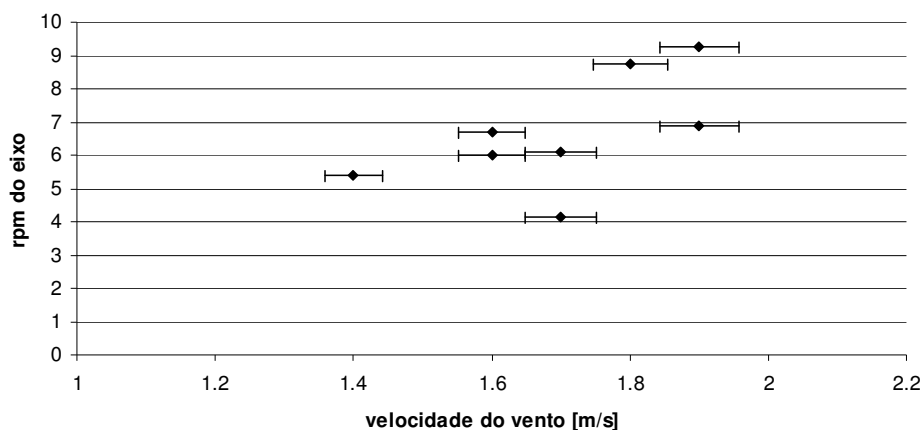


Figura 38 – Velocidade mínima de partida do aeromotor

Tomando-se os valores de velocidade mínima de partida do aeromotor, determinou-se através de uma média aritmética dos pontos obtidos no gráfico da Figura 38, o valor da velocidade do vento de partida.

Logo, a velocidade média de vento para a partida do aeromotor é de 1,7 m/s, sendo a máxima medida de 1,9 m/s e a mínima de 1,4 m/s.

A velocidade média de partida observada é considerada baixa quando se compara a valores citados na bibliografia deste trabalho. Aeromotores apresentam velocidades de partida entre 3 a 4 m/s. Os valores baixos medidos neste aeromotor devem-se especialmente a presença dos slots nas pás.

5.3 Medição do torque no eixo

O torque no eixo do aeromotor foi levantado com a utilização de um torquímetro montado no eixo de saída do redutor de velocidades e no próprio eixo do aeromotor.

O torquímetro utilizado para as medições de torque no eixo está mostrado na foto da Figura 39.



Figura 39 – Torquímetro

A Tabela 6 mostra as especificações do torquímetro utilizado.

TABELA 6 – Dados técnicos do torquímetro

Descrição	Precisão	Faixa de Medição
Torquímetro de estalo		
Modelo: FLEX-O-CLICK 4556	$\pm(2,5 \text{ N.m})$	0-150 N.m Resolução: 5 N.m
Fabricante: Gedore		

A Figura 40 mostra o detalhe da montagem do torquímetro no eixo do aeromotor.



Figura 40 – Posicionamento do torquímetro no eixo do aeromotor

Durante o período de medições (outubro de 2012) foram feitas cinco medições e foram observadas velocidades de vento de 2,3 m/s até 4,6 m/s, e uma velocidade média do vento no período das medições de 3,4 m/s.

A Tabela 7 mostra os parâmetros de aquisição que foram medidos neste experimento.

TABELA 7 – Medições de RPM e torque do eixo

Veloc. Vento m/s	RPM eixo	Temperatura C°	Torque N.m
2,3	11	25,8	2,5
3,2	17,8	25,6	10,0
3,4	21,5	21	10,0
3,5	21,8	25,4	12,5
4,6	35,2	22,7	22,5

Para as medições feitas no redutor de velocidades o torquímetro foi acoplado diretamente no eixo de saída; já para aquelas feitas diretamente no eixo do aeromotor foi utilizado um adaptador para acoplar o torquímetro.

A medida de torque foi validada sempre que a medição tenha sido executada com o aeromotor em velocidade constante, foram desconsideradas, portanto, medições na presença de rajadas de vento ou quando o aeromotor estivesse variando sua velocidade angular. Uma vez que a velocidade estivesse constante, o torquímetro foi acoplado e aplicou-se uma força contrária ao movimento de rotação do eixo do aeromotor com a finalidade de baixar sua velocidade angular, que foi medida simultaneamente. O valor necessário para baixar a velocidade angular do eixo do aeromotor foi considerado como o torque presente naquela situação de rotação e velocidade de vento.

O gráfico da Figura 41 apresenta os resultados das medições de torque em relação à velocidade de vento incidente com os erros de medição do torquímetro.

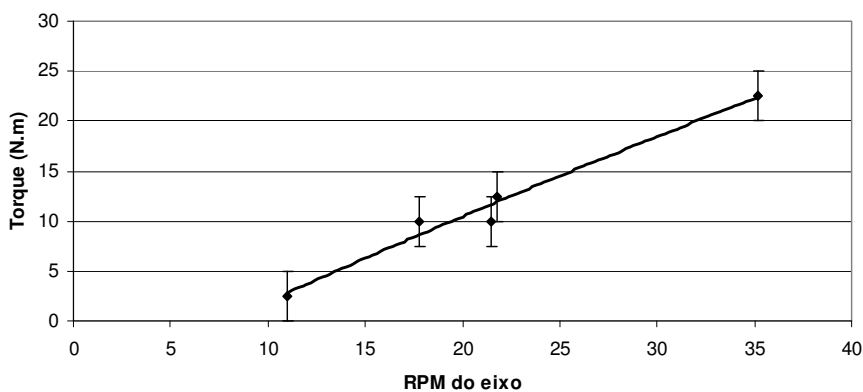


Figura 41 – Torque medido em relação ao RPM do eixo

Os valores de torque lidos apresentaram um aumento linear à medida que a velocidade do eixo aumentava.

5.3.1 Cálculo do torque teórico do eixo

O torque teórico que o aeromotor pode desenvolver depende da dimensão das pás, do perfil aerodinâmico utilizado, do diâmetro do rotor, da velocidade do vento incidente e da densidade do ar.

5.3.1.1 Correção da densidade do ar local

Um fator relevante que deve ser levado em consideração no cálculo das forças presentes nas pás do aeromotor é a densidade do ar local. A densidade do ar varia de acordo com a temperatura e a umidade do ar ambiente. Nesta correção de densidade levou-se em consideração apenas a influência da temperatura ambiente, por ser a mais relevante.

A média de temperatura observada durante as 5 medições de torque apresentadas no gráfico da Figura 40 foi de 24,1°C, então utilizando-se a Tabela 1 determinou-se o valor de densidade do ar ao nível do mar interpolando-se os valores de densidade para 20°C e 25°C.

Da Tabela 1, o valor de densidade do ar ao nível do mar para 24,1°C (297,25 K), é:

$$\rho_0 = 1,1876 \text{ kg / m}^3 \quad (53)$$

Com o valor da densidade do ar corrigido, através da equação (46) faz-se a correção da densidade do ar em relação à altitude de instalação do aeromotor.

A altitude de instalação do aeromotor foi adotada como sendo a mesma altitude padrão da cidade de Guaratinguetá em relação ao nível do mar.

z = altitude do local de instalação em relação ao nível do mar = 530 m

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T_0 + \nabla z}{T_0} \right)^{-\frac{g}{R_m \nabla} - 1} = 1,133 \text{ kg / m}^3 \quad (54)$$

5.3.1.2 Cálculo da Velocidade angular

O cálculo da velocidade angular é feito determinando-se a frequência pela equação (49). O valor da frequência é então substituído na equação (50) de onde se obtém a velocidade linear das pás e por sua vez o valor calculado da velocidade linear é substituído na equação (51) de onde se obtém a velocidade angular. Esta sequência de cálculo foi executada para os cinco pontos medidos.

5.3.1.3 Cálculo do ângulo de ataque

A velocidade aparente deve ser determinada, para isso a componente tangencial de velocidade e a normal devem ser calculadas.

Através da equação (32) determina-se o valor da velocidade tangencial do vento aparente presente nas pás. Nesta fórmula deve-se utilizar a velocidade angular já determinada anteriormente.

Através da equação (33) determina-se o valor da velocidade normal do vento aparente presente nas pás.

O ângulo de azimute deve variar de 0° a 360° de modo que toda a circunferência seja coberta pelo cálculo.

A velocidade relativa do vento incidente nas pás da turbina é calculada pela equação (35). O ângulo de ataque das pás é calculado pela equação (34), levando-se em consideração a velocidade normal e tangencial já calculadas.

5.3.1.4 Cálculo do torque no eixo

A força de sustentação presente nas pás é determinada a partir da equação (40).

O coeficiente de sustentação é determinado pelo software Design Foil (DREESECODE, 2011) levando-se em consideração o ângulo de azimute e o número de Reynolds para a velocidade de vento incidente.

A fim de se determinar a força resultante presente na pá, deve-se determinar a força de arrasto. Isto se dá pela equação (41).

O coeficiente de arrasto é determinado pelo software Design Foil (DREESECODE, 2011) levando-se em consideração o ângulo de azimute e o número de Reynolds para a velocidade de vento incidente.

As componentes horizontais das forças de sustentação e da força de arrasto são determinadas pelas equações (42) e (43), respectivamente.

Através da equação (45) determina-se o torque total no eixo.

Lembrando que a sequência de cálculo descrita deve ser repetida para cada ângulo de azimute onde os perfis das pás gerem sustentação.

A Tabela 8 apresenta os resultados de torque para ($\text{rpm} = 21,5$; $V_{\infty} = 3,4 \text{ m/s}$). O cálculo foi repetido variando o ângulo de azimute de 15 em 15 °.

TABELA 8 – Torque teórico disponível no eixo (rpm = 21,5; $V_\infty = 3,4$ m/s)

θ	V_c [N]	V_n [N]	w [m/s]	α [°]	C_L	C_d	F_L [N]	F_d [N]	α' [°]	T [N.m]
0°	6.78	0.00	6.78	0	0.00	0.01	0.00	0.06	90	-0.08
15°	6.66	0.88	6.72	7	0.87	0.02	13.41	0.07	83	2.35
30°	6.30	1.70	6.52	15	1.39	0.03	20.09	0.13	75	7.64
45°	5.78	2.40	6.26	21	1.17	0.05	15.53	0.21	69	8.10
60°	5.08	2.94	5.87	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
75°	4.26	3.28	5.38	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
90°	3.38	3.40	4.79	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
105°	2.49	3.28	4.12	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
120°	1.68	2.94	3.39	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
135°	0.97	2.40	2.59	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
150°	0.43	1.70	1.75	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
165°	0.09	0.88	0.89	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
180°	-0.02	0.00	0.02	0	0.00	0.01	0.00	0.05	90	-0.07
195°	0.09	-0.88	0.89	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
210°	0.43	-1.70	1.75	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
225°	0.97	-2.40	2.59	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
240°	1.68	-2.94	3.39	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
255°	2.49	-3.28	4.12	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
270°	3.38	3.40	4.79	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
285°	4.26	-3.28	5.38	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
300°	5.08	-2.94	5.87	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	-
315°	5.78	-2.40	6.26	-21	1.17	0.05	15.53	0.21	69	8.10
330°	6.30	-1.70	6.52	-15	1.39	0.03	20.09	0.13	75	7.64
345°	6.66	-0.88	6.72	-7	0.87	0.02	13.41	0.07	83	2.35

O torque total disponível para os dados apresentados na tabela 8 (rpm = 21,5; $V_\infty = 3,4$ m/s) é trazido pela equação (55).

$$T_{(rpm=21,5; V_\infty=3,4m/s)} = 13,51 \text{ N.m} \quad (55)$$

O gráfico da Figura 42 apresenta o torque teórico calculado para as mesmas velocidades de vento medidas e apresentadas no gráfico da Figura 41.

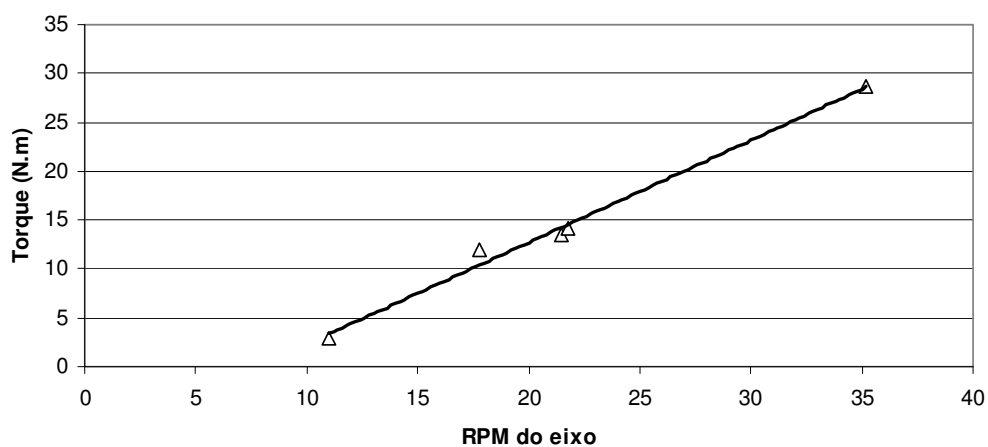


Figura 42 – Torque calculado em relação ao RPM do eixo

O gráfico da Figura 43 faz um comparativo das curvas de torque medida e calculada.

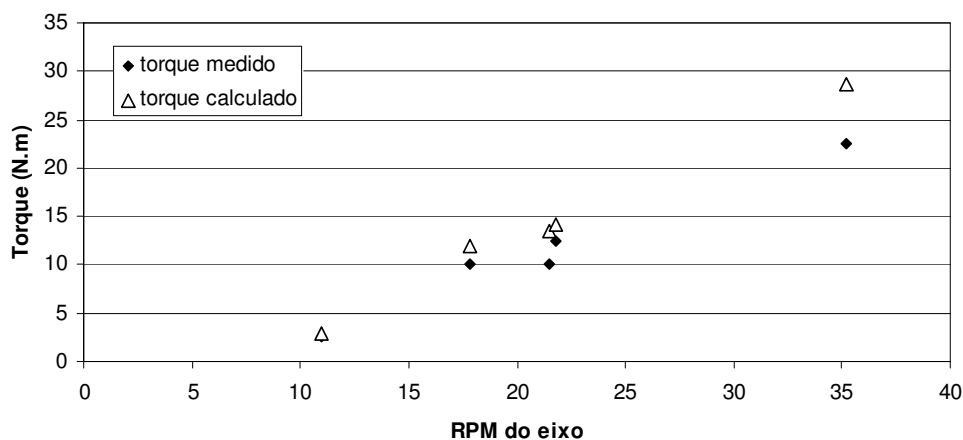


Figura 43 – Comparativo das curvas de torque medido e calculado

Nota-se que o torque medido apresenta uma diferença em relação ao teórico e esta diferença aumenta à medida que a rotação do eixo aumenta, isto se deve principalmente às perdas mecânicas que o equipamento apresenta, entre elas pode-se citar o desbalanceamento do rotor, que foi sentido durante medições de rotações mais elevadas, a partir de 40 RPM e o peso do conjunto motriz.

5.3.2 Cálculo do coeficiente de potência

Para a determinação do coeficiente de potência, primeiro calculou-se a potência baseada no valor de torque total obtido através da equação (55) e na velocidade angular já determinada pela equação (51).

$$P = T_t \omega \quad (56)$$

Sendo:

P = potência [W]

ω = velocidade angular do rotor [rad/s]

T_t = torque total [N.m]

Utilizando a fórmula de potência dada pela equação (25), calculou-se o coeficiente de potência.

A potência e o coeficiente de potência foram calculados para todos os pontos de medição de torque apresentados na Tabela 7. Tomando-se os valores de torque medidos e os calculados, calculou-se a potência real e a teórica e fez-se um comparativo em função da velocidade de vento incidente. O gráfico da Figura 44 apresenta os resultados.

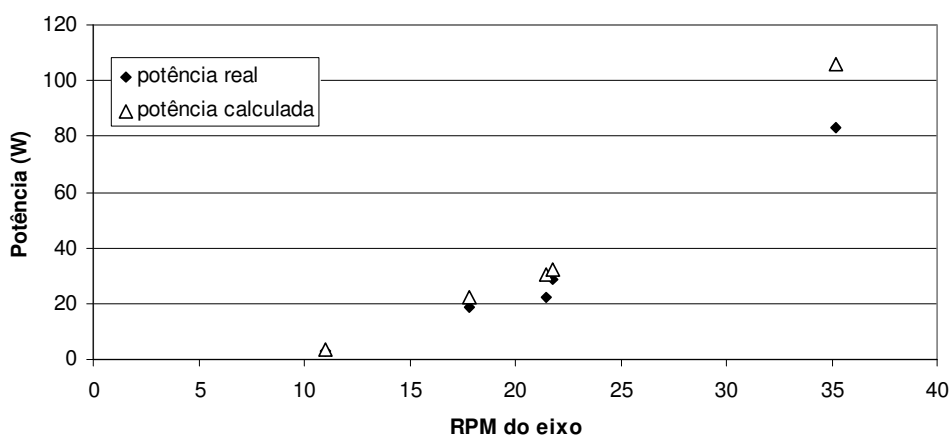


Figura 44 – Comparativo das curvas de potência real e calculada

O comportamento da curva de potência real e calculada para o aeromotor é esperado também em máquinas disponíveis comercialmente, observando-se o gráfico da Figura 11 para velocidades de vento até 5 m/s, nota-se que a potência é proporcional ao aumento da velocidade do vento incidente.

Apesar de não ter sido medido, espera-se um comportamento não linear da potência produzida pelo equipamento em velocidades de vento maiores, isto ocorre devido ao aumento exponencial da força de sustentação presente nas pás.

O gráfico da Figura 45 apresenta o comparativo do coeficiente de potência medido e calculado.

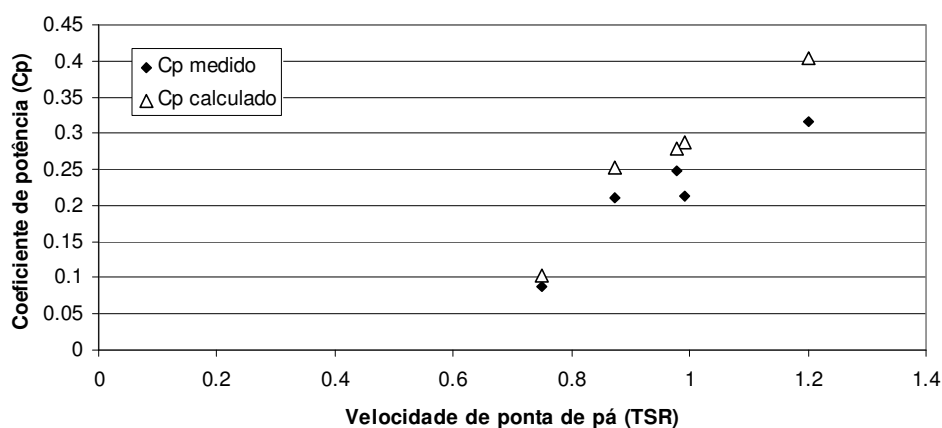


Figura 45 – Comparativo do coeficiente de potência medido e calculado

Nota-se pelo gráfico da Figura 45 que o coeficiente de potência medido e calculado também apresentou, assim como a potência, um comportamento proporcional ao aumento da velocidade de ponta de pá. Pelo gráfico da Figura 11, para uma máquina disponível comercialmente, nota-se comportamento similar para mesma faixa de velocidade de ventos incidente.

5.4 Comparativo com turbinas eólicas comerciais

A maioria das máquinas eólicas disponíveis no mercado brasileiro é de eixo horizontal equipadas com geradores para a produção de energia elétrica. Para efeito de comparação, dados de potência e velocidade de partida foram coletados nos sítios dos

fabricantes ENERSUD e SOUTHWEST Wind Power e comparados com os dados obtidos no aeromotor de eixo vertical.

O gráfico da Figura 46 é do modelo Wisper 100 fabricado pela SOUTHWEST Wind Power, este modelo possui um diâmetro do rotor de 2,1 m, o que se traduz em uma área varrida de 3,46 m², de acordo com a equação (30), menor portanto que a área varrida pela máquina aqui desenvolvida, que é de 4,73 m², de acordo com o cálculo feito pela equação (31).

O gráfico, único disponível no catálogo, apresenta dados de geração de energia por mês em relação à velocidade de vento incidente. Pelo gráfico percebe-se que para uma velocidade de vento incidente de aproximadamente 5 m/s, a energia gerada pelo modelo Wisper 100 é de aproximadamente 90 kWh, o que significa dizer que o modelo gera 125 W usando a premissa de considerar 24 horas por dia e 30 dias por mês de geração no cálculo mensal. Na Tabela 7, para 4,6 m/s de vento incidente no aeromotor de eixo vertical, a máquina girou a 35,2 RPM e gerou 82 W, como pode ser observado pelo gráfico da Figura 44.

Como a potência foi calculada com base no torque medido no eixo, para se comparar os valores de potência calculado no aeromotor e desenvolvido pelo modelo Wisper 100, deve-se levar em consideração que o gerador elétrico acoplado no eixo do modelo comercial possui um rendimento menor que o ideal. Assumindo que este rendimento seja igual a 95%, a potência disponível no eixo da máquina Wisper 100 sob um vento incidente de 5 m/s seria de 131,5 W.



Figura 46 – Energia mensal em relação à velocidade de vento incidente (SOUTHWEST Wind Power, 2012)

Então, pode-se afirmar que a diferença entre as potências que o aeromotor de eixo vertical produziu e que o modelo Wisper é capaz de produzir é de 49,5 W ou 60 %, nesta condição comparada. No catálogo do fabricante não é informado em que condições de pressão atmosférica ou densidade do ar o modelo foi testado. Se assumirmos que o modelo Wisper 100 foi testado sob temperatura e pressão da ISA, 15°C e 1 atm respectivamente, a densidade do ar é de $1,225 \text{ kg/m}^3$, de acordo com a tabela 1, que difere em 8% do valor de densidade que o aeromotor de eixo vertical foi testado ($1,133 \text{ kg/m}^3$) e que resulta numa diferença de 8% na potência desenvolvida, logo a potência que o modelo Wisper 100 produziria, sob a mesma condição de densidade, seria 121 W, 47,5 % maior que a do aeromotor de eixo vertical. Nota-se que o modelo comercial apresenta vantagem na geração de potência com uma área varrida menor, porém, tem um custo de aquisição maior que o modelo aqui desenvolvido.

A velocidade de partida é fornecida nos catálogos dos modelos da ENERSUD. Os modelos Notus 138/112 de 250 W, Gerar de 1000 W e Verne 555 de 6000 W

possuem velocidade de partida de 2,2 m/s. Não se especifica nos catálogos se esta velocidade corresponde ao início do movimento do aeromotor ou se corresponde ao início da produção de energia elétrica. Assumindo que seja o início do movimento do equipamento, nota-se que o aeromotor de eixo vertical parte a uma velocidade mais baixa, de 1,7 m/s. Isto é um fator importante em locais onde a velocidade de vento incidente não é tão alta, porque contribui para aumentar o tempo que o aeromotor está disponível.

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desafio de construir um aeromotor de eixo vertical com extrema restrição orçamentária foi vencido. A máquina apresentada neste estudo teve um custo total de fabricação inferior a USD 2.000,00, o valor da verba limitou a altura total da torre a 6m e também a utilização de materiais mais leves, tais como alumínio aonde foi usado aço, ou fibra de carbono aonde foi utilizado alumínio. A altura da torre e os materiais mais pesados influenciaram diretamente o desempenho do equipamento. Em seu projeto foram utilizados materiais comercialmente disponíveis para a fabricação das pás e seus revestimentos, do eixo de transmissão e seus mancais de rolamentos.

Os resultados experimentais mostraram que o aeromotor de eixo vertical se mostra adequado ao local de instalação, mesmo sem ter desenvolvido altos valores de potência de saída.

Analisando-se a curva de rotações por minuto do eixo em função da velocidade do vento percebe-se que a velocidade do eixo cresceu exponencialmente em relação ao aumento linear da velocidade do vento observada. Isto era esperado visto que, quanto maior for a velocidade das pás, maior será a força de sustentação presente e esta força varia em função da velocidade do vento ao quadrado. Observou-se também que a velocidade máxima do equipamento não foi obtida, pois a curva não apresentou ponto de inflexão.

Os maiores valores de velocidade de ponta de pá observados ocorreram durante o levantamento do comportamento da máquina em relação à velocidade do vento incidente e chegaram a 1,4, estão abaixo de níveis considerados ideais pela bibliografia, em torno de 2,5, porém este valor varia em função da velocidade do vento e sabe-se que no local de instalação não se mediu mais que 7 m/s, sendo a média de 3,85 m/s. Conclui-se, porém que as pás impeliram o rotor por força de sustentação sempre que os valores de velocidade de ponta de pá foram superiores a 1.

O valor de velocidade de partida de 1,7 m/s está abaixo de valores encontrados comumente neste tipo de máquina, o que mostra que os *slots* cumpriram sua função de

gerar arrasto facilitando a partida. Foi observado também que o equipamento partiu sem auxílio externo independente do vento incidente estar mudando constantemente de direção, o que corrobora para mostrar que o aeromotor de eixo vertical é a melhor opção para o local.

Os resultados das medições de torque mostraram que o equipamento tem a capacidade de ser acoplado com geradores ou bombas d'água de pequeno porte. Apesar dos valores do coeficiente de potência calculado estarem dentro do que se espera para este tipo de rotor, o valor máximo de potência registrado mostra que o local de instalação não se mostra promissor do ponto de vista de exploração ou instalação de equipamentos eólicos

O desempenho geral da máquina em estudo mostrou-se compatível com máquinas comercialmente disponíveis, o que, por si só, mostra que o aeromotor pode ser melhorado para gerar mais torque e potência.

Como desenvolvimento futuro, as sugestões são de se trocar o material de fabricação das pás e das hastes a fim de baixar o peso do conjunto motriz, utilizar pás de arrasto com características de alto torque que desenvolvem baixa rotação, desenvolver um sistema que varie o ângulo de ataque das pás a fim de otimizar os valores de força de sustentação e por consequência o torque e potência finais, além de aumentar a altura da torre, onde haveria um aumento do valor do vento incidente médio, o que, acredita-se, aumentaria o desempenho do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULRAHMAN, L. A.; MAJEED, A. A.; **Optimization-based steady state analysis of three phase self-excited induction generator**, - IEEE Transactions on Energy conversion, vol. 15, No 1, March 2000.

ANDREAS J. C.; **Energy-Efficient Electric Motors – Selection and application**, Marcel Dekker, inc, New York, 1982, pp. 58 – 70.

BURTON, T. et al; **Wind Energy Handbook**, JohnWiley & Sons, Ltd, 2001, pp 41-92.

CLAESSENS, M. C.; **The Design and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines**, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 113p, 2006.

CRESESB; consulta na internet no seguinte endereço: <[http://www.cresesb.cepel.br/content.php?catid\[\]=1&catid\[\]=5](http://www.cresesb.cepel.br/content.php?catid[]=1&catid[]=5)>, acessado em março, 2012.

D’ALESSANDRO, V.; MONTELPARE, S.; RICCI, R.; SECCIHIAROLI, A.; **Unsteady Aerodynamics of a Savonius wind rotor: a new computational approach for the simulation of energy performance**, Ancona, Italy: Science Direct, 2010.

DRESSE CODE; consulta na internet no seguinte endereço: <<http://www.dreese.com/>>, acessado em dezembro, 2011.

ENERCON; consulta na internet no seguinte endereço: <<http://www.enercon.de/pt-pt/>>, acessado em setembro, 2012.

ENERSUD; consulta na internet no seguinte endereço: <http://enersud.com.br/?page_id=149>, acessado em novembro, 2012.

ERIKSSON, S. et al; **Evaluation of different turbine concepts for wind power**, Science Direct - Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 2008, pp 1419–1434.

FAA; consulta na internet no seguinte endereço: <<http://www.faa.gov>>, acessado em maio, 2012.

HOWELL, R. et al; **Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine**, Renewable Energy 35, 2010, pp 412–422.

ISLAM, M. et al; **Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines**, Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 2008, pp1087–1109.

MOURA, L. F. S.; **Cata-vento: Método de Seleção e Resultados Obtidos pelo Centro de Energias Renováveis da UNESP campus Guaratinguetá**, trabalho bolsa FAPESP, 2010.

OLEG, C.; **Voltage stabilization system induction generator in stand alone mode** - IEEE Transaction, vol. 14, No 3, September 1999.

PRADINES, L.; **Fundamentos da Teoria de Voo**, Edições Inteligentes, 2004.

REIS, L. O. M.; **Lógica Fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia elétrica: eólica, fotovoltaica e biogás**, Tese de doutorado – Guaratinguetá : [s.n.], 2002.

SOUTHWEST WIND POWER; consulta na internet no seguinte endereço: <http://www.windenergy.com/sites/all/files/Whisper%20100%20Spec%20Sheet_0.pdf>, acessado em novembro, 2012.

VILLAR ALÉ, J. A. et al; **Performance Evaluation of the next Generation of Small Vertical Axis Wind Turbine**, PUCRS, 10p, 2007.

WAHL, M.; **Designing an H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station**, Uppsala University, Sweden, 20p, 2007.

WENZEL, G. M.; **Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas de Eixo Horizontal**, Trabalho de conclusão de curso, PUC-RS, 2007, pp 15-17.

WHITTLESEY, R. W. et al; **Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design**, Bioinspiration&Biomimetics IOP Publishing, pp 1-6, 2010.

WILSON, R.E., **Wind Turbine Aerodynamics**; Journal of Industrial Aerodynamics, Elsevier Publishing, pp 357-372, 1980.

BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

AL-BARADLY, I., et al; **Building a Wind Turbine for Rural Home**, Energy for Sustainable Development 13 pp 159–165, 2009.

BISHOP, J. D. K., et al; **Evaluation of Small Wind Turbines in Distributed Arrangement as Sustainable Wind Energy Option for Barbados**, Energy Conversion and Management 49 pp 1652–1661, 2008.

EL-SAMANOUDY, M, et al; **Effect of Some Design Parameters on the Performance of a Giromill Vertical Axis Wind Turbine**, Ain Shams Engineering Journal 1, 85–95, 2010.

HAU, E.; **Wind Turbines**, 2nd edition, Editora Springer, 2006.

LI, Y., et al; **Performance Effects of Attachment on Blade of a Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine**, Current Applied Physics 10 pp S335–S338, 2010.

MARINO, M., et al; **Performances of Different Wind Turbines with Different Shapes**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 39 pp 83-93, 1992.

MULLER, G., et al; **Vertical Axis Resistance Type Wind Turbines for Using in Buildings**, Renewable Energy 34 pp 1407–1412, 2009.

NEUMANN, A. L.; **La Energía Eólica: Principios Básicos y Tecnología**; Leganés; 2002.

POPE, K., et al; **Energy and Exergy Efficiency Comparison of Horizontal and Vertical Wind Turbines**, Renewable Energy 35 pp 2102-2113, 2010.

SHARMA, R.N., MADAWALA, U.K.; **Renewable Energy** **39** pp 403-410, 2012.

THUMTHAE, C., CHITSONBOON, T.; **Optimal Angle of Attack for Untwisted Blade Wind Turbine**, *Renewable Energy* 34 pp 1279–1284, 2009.