



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO – DEMECP

MARCELO RODRIGO RABELO

ISMALE PEREIRA CASTRO

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL
NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES.**

São Luís

2016

MARCELO RODRIGO RABELO
ISMALE PEREIRA CASTRO

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL
NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Esp. Marco Selner Mesquita Viana

São Luís

2016

MARCELO RODRIGO RABELO
ISMALE PEREIRA CASTRO

**ESTUDO E DIMENSIONAMENTO DE AEROGERADOR DE EIXO HORIZONTAL
NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA VEÍCULOS AUTOMOTORES.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão, como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovação em: ___ / ___ / ___.

BANCA EXAMINADORA

Prof.º Esp. Marco Selner Mesquita Viana (Orientador)

Especialista em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof.º Antônio Pereira e Silva

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof.º Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira

Universidade Estadual do Maranhão

A Deus todo poderoso e a nossa família
pelo incentivo e compreensão pelos
momentos de nossa ausência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Senhor Deus todo poderoso que todo dia nos abençoa com o sopro de vida e nos dá saúde e força para superarmos os desafios diários deste grande dilema que é viver.

Aos meus pais, Diana Rabelo e Josinaldo Gomes, que me educaram para a vida, e me fizeram o homem que hoje eu sou, devo tudo a eles. Não posso deixar de citar meus tios Rita e Evandro, os quais também foram peças fundamentais nesta minha grande jornada, muito obrigado à todos. Vixe, já ia esquecendo essa minha pequenina Anna Sophya, coisinha do sorriso mais lindo que ama esse “Titiooo” dela, a você também, Obrigado por me atrapalhar muitas vezes. Amo vocês.

Ao professor Orientador Marco Selner pelo apoio, por sempre incentivar-nos nessa árdua tarefa e por frequentes ideias para resolução de problemas os quais nós nunca pensaríamos como resolver.

Meus sinceros agradecimentos a todos os meus amigos da turma de Engenharia Mecânica 2011.2, pois sem vocês tenho certeza que não teria sido tão boa essa batalha, por todo esse sentimento de união, por essa verdadeira família que construímos ao logo desses cinco anos e que nos inspiraram na busca por esse título de Engenheiros Mecânicos.

Sempre há aqueles que se destacam em meio a alguns nomes na turma e dentre estes eu não poderia deixar de citar o meu companheiro de trabalho Ismale Castro pelo apoio, meus amigos Jeyce Cabeça, Touru, Kayo, Rod, Mestre Roniel estes que me ajudaram bastante ao longo desse curso. Dentre outros nomes que eu gostaria de citar, mas teria que fazer isso em uma resma pra conseguir falar de cada um, Micha por sempre dar aquela ajudinha no Solid, Uengles na elétrica e Dan nos equipamentos de medição. Obrigado Amigos!

Agradecer a você Helena Souza, minha namorada, pessoa essa que me faz tão bem e que sempre me apoiou e deu forças, mulher que sempre torceu por mim e mais do que ninguém me incentivou a chegar até aqui. Obrigado, Neguinha!

A toda a galera do bairro, os parceiros da pelada, a galera da Serralheria Rodrigues que sempre nas brincadeiras e nas doses de burro preto conseguiam fazer com que discussões a respeito de diversos assuntos fossem abordados na mais sincera mulecagem.

O famoso Joãozinho da oficina, na Ilhinha, que se não fosse por ele muitas dúvidas não seriam tiradas, muito obrigado meu peixe. A toda aquela galera da oficina pela imensa ajuda neste protótipo, valeu mesmo.

Marcelo Rabelo.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me dá oportunidade de fazer um curso extraordinário e conhecer pessoas que ficarão para sempre em minha vida, agradecer ao professor Marco Selner por nos orientar e instruir nesse projeto, agradecer a minha família que fez o que pode para contribuir com essa formação, agradecer ao meu amigo Maycharlyson por me ajudar em muitos momentos e sempre fazer o que estava ao seu alcance, ao meu amigo Marcelo, por estar junto a mim no desenvolvimento desse projeto, ao Junior que também ajudou muito nessa caminhada nos fins de semana que passamos estudando valeu a pena. Agradecer ao meu amigo Luís, que foi de extrema ajuda no projeto da nossa pá eólica, agradecer a minha tia Creusa, que foi uma mãe nessa caminhada. São muitas pessoas que merecem esse muito obrigado, mas que com toda certeza, nem que por um instante ou por uma palavra, contribuíram com essa graduação. À todos muito obrigado.

Agradecer aos meus amigos da turma engenharia mecânica 2011.2. Sem eles não seria tão importante essa graduação, que sempre permanecemos unidos, mesmo nas maiores dificuldades que enfrentamos.

Agradecer ao meu amigo Joãozinho, que foi de extrema ajuda no desenvolvimento deste projeto com seu conhecimento absurdo sobre o assunto e a galera da oficina do bairro, que deram bastante dicas sobre o protótipo. Valeu e muito obrigado!

Ismale Castro.

“A nossa recompensa está no esforço,
não no resultado. Um esforço total
é uma vitória completa.”

Mahatma Gandhi

RESUMO

Energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem a sua transformação em energia mecânica. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial. Chegando aos dias atuais, sendo muito utilizada devido à grande necessidade de fontes alternativas e levando em conta a indústria automobilística se adequando as novas normas de emissão de poluentes, eis que esse projeto bate justamente nessa tecla, aproveitamento de energia eólica em veículos. Sendo este projeto uma inovação tecnológica, ou seja, uma coisa que ainda não se tem no mercado e que se busca constantemente por todo mundo, buscou-se projetar toda uma estrutura com dimensões apropriadas e que atendessem nosso objetivo, projetamos as pás da mesma forma que uma turbina eólica de grande porte para se obter o máximo de rendimento, de forma que chegamos a um protótipo final e funcional, lembrando que nosso objetivo é apenas gerar energia e não que o projeto fosse auto suficiente em energia.

Palavras-chave: Energia Eólica. Turbina. Aplicação em Veículos.

ABSTRACT

Wind energy has been used for thousands of years for the same purposes, namely water pumping, grinding of grains and other applications involving mechanical energy. For the generation of electricity, the first attempts appeared in the late nineteenth century, but only a century later, with the international oil crisis (1970), there was enough interest and investment to enable the development and application of equipment in Commercial scale. Arriving in the present day being much used due to the great need of alternative sources and taking into account the automobile industry adjusting to the new norms of emission of pollutants, behold that this project hits precisely on this key, use of wind energy in vehicles. Since this project is a technology innovation, that is, something that has not yet been in the market and is constantly being sought by everyone, we have tried to design a whole structure with appropriate dimensions and that meets our objective, we design the blades in the same way That a large wind turbine to obtain the maximum yield, so that we arrive at a final and functional prototype, remembering that our objective is only to generate energy and not that the project was self sufficient in energy.

Keywords: Wind Energy. Turbine. Application in Vehicles.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela do perfil GOTTINGEN 602	43
Tabela 2 - Tabela com as dimensões da pá	44
Tabela 3 - Propriedades dos imãs permanentes.....	73
Tabela 4 - Faixa de variação de parâmetros de projetos de máquinas de fluxo axial	79
Tabela 5 - Dados referentes às dimensões do aerogerador.....	88
Tabela 6 - Resultados obtidos nos testes	90
Tabela 7 - Tabela de custos dos componentes utilizados	93

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacidade de energia eólica instalada mundial e acumulada	19
Figura 2 - Exemplos de turbinas (da esquerda para a direita: Savonios e Darrieus).....	24
Figura 3 - Representação de um perfil alar.....	26
Figura 4 - Convenção GÖTTINGEM (esquerda) e NACA (direita).....	26
Figura 5 - Corda de um perfil	27
Figura 6 - Linha média de perfil.....	27
Figura 7 - Espessura do perfil.....	28
Figura 8 - Turbina em operação	29
Figura 9 - Vista frontal de um aerogerador em movimento para observação do corte	29
Figura 10 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina.....	29
Figura 11 - Turbina de sustentação.....	30
Figura 12 - Nacele	31
Figura 13 - Turbina Eólica de Eixo Vertical - TEEV.....	32
Figura 14 - Força aplicada sobre o disco	33
Figura 15 - Resistência do ar sobre o disco	34
Figura 16 - Movimento do ar sobre a superfície	35
Figura 17 - Espectro aerodinâmico do disco	36
Figura 18 - Distribuição e resultante das pressões sobre o disco	36
Figura 19 - Valor relativo da resistência para diversos sólidos do mesmo diâmetro.....	38
Figura 20 - Perfil situado no seio de uma corrente fluida	40
Figura 21 - Forças de sustentação em um perfil com grande inclinação.....	41

Figura 22 - Forças de sustentação em um perfil com pequena sustentação	41
Figura 23 - Coeficiente de arrasto e sustentação	42
Figura 24 - Dimensões do perfil no eixo x	44
Figura 25 - Pontos do perfil.....	45
Figura 26 - Perfil traçado.....	45
Figura 27 - Perfil modelado no solidworks (vista lateral)	45
Figura 28 - Perfil modelado no solidworks (vista isométrica)	46
Figura 29 - Fluxo de ar através de uma área transversal “A”	47
Figura 30 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.....	48
Figura 31 - Distribuição de c_p em função de v_3/v_1	50
Figura 32 - Distribuição de c_p em função de λ para diversos tipos de rotores.....	51
Figura 33 - Gráfico de relação Solidez/TSR	52
Figura 34 - Velocidades e forças atuando sobre uma seção da pá de um rotor.....	53
Figura 35 - Gráfico do coeficiente de sustentação e arrasto.....	55
Figura 36 - Gráfico coeficiente de sustentação por alpha	55
Figura 37 - Máquina Síncrona	59
Figura 38 - Rotor de uma maquina assíncrona com anéis.....	59
Figura 39 - Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo Radial	66
Figura 40 - Secção transversal da máquina de ímã permanente com rotor interno.....	67
Figura 41 - Secção transversal da máquina de ímã permanente com rotor externo	67
Figura 42 - Máquina de fluxo magnético axial com ímãs permanentes, mostrando fluxo dos ímãs permanentes e direção da corrente	68
Figura 43 - Comparativo entre máquinas de fluxo axial e fluxo radial.....	70
Figura 44 - Fluxo magnético em ímã permanente	71
Figura 45 - Evolução dos ímãs permanentes ao longo da história	72
Figura 46 - Formas construtivas de Máquinas de Fluxo Axial	73
Figura 47 - Topologias de AFPMSG.....	74
Figura 48 - Máquina de fluxo axial de polos salientes	75
Figura 49 - Retificador RS405L	76
Figura 50 - Fluxograma de organização do projeto.....	80
Figura 51 – (a) Fabricação dos Rotores; (b) Rotores com ímãs permanentes.....	82
Figura 52 - (a) Retiragem da carcaça do ventilador; (b) Remoção de rolamentos danificados	83
Figura 53 - Usinagem do eixo do estator.....	84
Figura 54 - Usinagem de pás	84

Figura 55 - Base da fuselagem frontal.....	85
Figura 56 - Frente do Aerogerador protótipo "Avatar"	86
Figura 57 - Vistas do protótipo "Avatar" (a) Frontal; (b) Lateral e (c) Isométrica	86
Figura 58 - Protótipo "Avatar" finalizado e ponte retificadora	87
Figura 59 - Esquema de ligação para testes usando fritzing.....	89
Figura 60 - Circuito de ligação para testes usando Fritzing	90
Gráfico 1 - Relação entre velocidade do carro, velocidade do vento e tensão gerada nos testes do protótipo "Avatar"	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
TEEV	Turbina eólica de eixo vertical
TEEH	Turbina eólica de eixo horizontal
TSR	Tip Speed Ratio
DFIG	Gerador de Indução Duplamente Alimentado
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
AFPMSM	Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine
ENERSUD	Indústria e Soluções Energéticas Ltda.
IPFA	Ímãs Permanentes de Fluxo Axial
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal	m^2
A_p	Área da superfície da pá	m^2
A_r	Área do rotor	m^2
α	Ângulo de ataque	$^\circ$
B	Fluxo magnético entreferro	
c	Corda	m
C_d	Coefficiente de arrasto	
C_l	Coefficiente de sustentação	
C_p	Coefficiente de potência	
CW	Coefficiente de resistência	
D_b	Diâmetro do bosso	m
D_i	Diâmetro interno	m
D_r	Diâmetro do rotor	m
E_i	Campo elétrico	
f	Frequência do gerador	hz
FD	Força de arrasto	N
f_g	Frequência angular	$^\circ$
FL	Força de sustentação	N
F_x	Força axial	N
Ht	Altura da base	m
I	Corrente	A
K	Coefficiente de forma	
L	Comprimento do estator	m
\dot{m}	Massa de ar	Kg/s
n	Velocidade nominal do rotor	rpm
N_p	Número de pás	
\emptyset	Fluxo magnético	wb
Φ	Ângulo de escoamento	$^\circ$
θ_e	Ângulo elétrico	$^\circ$
θ_m	Ângulo mecânico	$^\circ$
p	Números de polos	

P_m	Potência mecânica	w
P_r	Potência aproveitada pelo rotor	w
P_v	Potência do vento	W
ρ	Densidade do ar	Kg/m^3
R	Raio do rotor	m
R_T	Resistência do Estator	Ω
R_b	Raio do bossô	m
Re	Reynolds	
S	Superfície	m^2
T	Torque	N.m
t_p	Passo polar	mm
U	Velocidade do vento	m/s
U_T	Tensão da turbina	V
V	Velocidade	m/s
V_m	Volume	m^3
ν	Viscosidade cinemática do ar	m^2/s
W	Velocidade relativa do vento	m/s
ω	Velocidade angular do rotor	rpm
ω_e	Frequência angular	Rad/s
ω_m	Velocidade mecânica	Rad/s
X	Porcentagem da corda	cm
Y_1	Linha do extradorso	cm
Y_2	Linha do intradorso	cm
σ	Solidez do rotor	%
λ	Tip speed ratio	
ξ_A	Densidade de potência axial	w/m^3
ξ_M	Densidade de potência	w/m^3
$\xi_M R$	Densidade de potência radial	w/m^3

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
1.2. Justificativa.....	20
1.3. Objetivos	21
1.3.1. Objetivo Geral	21
1.3.2. Objetivos Específicos	21
CAPÍTULO II.....	22
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1. Aspectos históricos da energia eólica	22
2.2. Organização de Capítulos	23
CAPÍTULO III	24
3. TURBINAS EÓLICAS/AEROGERADORES	24
3.1. Princípio Básico de Funcionamento	24
3.1.1. Aerodinâmica da Turbina.....	25
3.1.2. Perfil Alar.....	26
3.1.3. Características Geométricas	27
3.1.4. Forças Aerodinâmicas	28
3.2. Aerogerador de Eixo Horizontal	30
3.3. Aerogerador de Eixo Vertical	31
CAPÍTULO IV.....	33
4. CONFIGURAÇÃO AERODINÂMICA.....	33
4.1. Resistência do ar	33
4.2. Forças sobre um perfil.....	40
4.3. Forças de arrasto e sustentação em perfis fixos.....	42
4.4. Escolha e desenho do perfil	42
4.5. Determinação da potência	46
CAPÍTULO V	58
5. CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA.....	58
5.1. Geradores	58
5.2. Máquinas de corrente contínua	60
5.3. Topologia de Aerogeradores	60
5.3.1. Máquinas síncronas convencionais	60

5.3.1.1. Gerador Síncrono conectado a rede via conversor de potência com excitação e sem caixa de transmissão.	61
5.3.1.2. Gerador síncrono conectado a rede via conversor.	61
5.3.1.3. Gerador síncrono conectado diretamente a rede.	61
5.3.1.4. Gerador Síncrono com transmissão hidrostática.	62
5.3.2. Máquina de indução	62
5.3.2.1. Gerador de indução conectado diretamente a rede.	62
5.3.2.2. Gerador de indução com controle de escorregamento	63
5.3.2.3. Gerador de Indução conectado a rede via conversor.	63
5.3.2.4. Gerador de Indução duplamente alimentado (DFIG).	64
5.3.3. Máquina síncrona a ímã permanente.	64
5.3.3.1. Gerador Síncrono a Imã Permanente	65
5.4. Ímãs permanentes	71
5.4.1. Classificação dos Ímãs Permanentes	72
5.5. Topologia das Máquinas de Fluxo Axial.	73
5.6. Retificadores	75
5.7. Máquina de fluxo utilizada neste trabalho.	76
CAPÍTULO VI.	80
6. MÉTODO E MATERIAL	80
CAPÍTULO VII	82
7. TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE COM EIXO HORIZONTAL ADAPTADO DE MOTOR DE VENTILADOR ELÉTRICO.	82
7.1. Montagem e procedimentos experimentais	82
7.1.1. Construção dos rotores	82
7.1.2. Adaptação do Estator	83
7.1.3. Confecção das pás	84
7.1.4. Fuselagem Frontal	85
7.1.5. Montagem do protótipo	85
7.1.6. Ferramentas e equipamentos utilizados.	88
CAPÍTULO VIII	89
8. RESULTADOS E DISCUSSÕES	89
8.1. Testes	89
8.2. Avaliação de custos	93
CAPÍTULO IX.	95

9. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	95
REFERÊNCIAS	96
APÊNDICE A – Configuração Aerodinâmica	101
APÊNDICE B – Configuração Elétrica.....	103
APÊNDICE C – Protótipo “Avatar”	104

1. INTRODUÇÃO

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de eletricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento d'água (ANEEL, 2002).

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial (ANEEL, 2002).

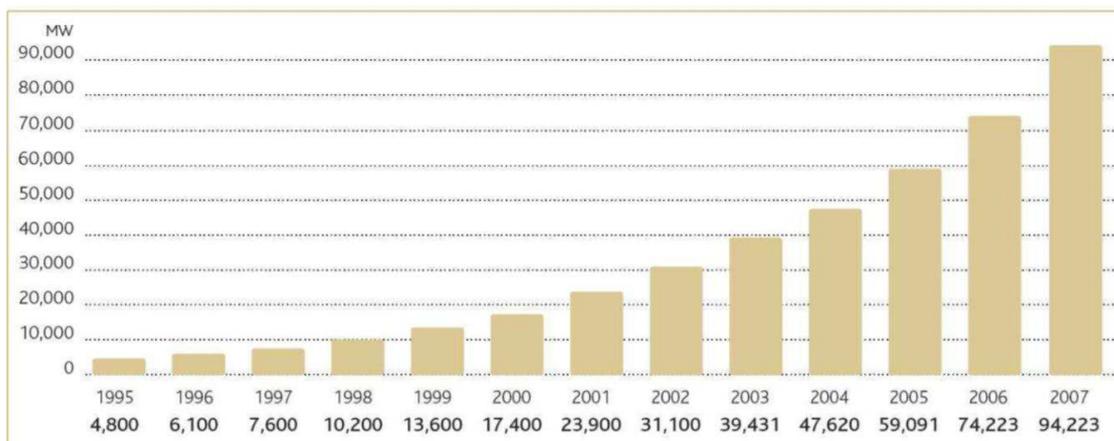
A energia elétrica assim produzida pode ter diversas aplicações: pode ser armazenada em acumuladores, pode ser distribuída aos consumidores através da rede elétrica ou pode, ainda, ir alimentar cargas isoladas. Este sistema de conversão de energia também produz perdas (BRIZON, SCHILD, ANSELM & NASSER, [2004]).

A produção de energia em quantidade suficiente e com custos médios reduzidos consiste em uma das condições para a sustentabilidade da produção e por consequência a expansão do mercado. Esta expansão é um fator determinante no aumento da renda e do emprego e como consequência do crescimento econômico (SMITH, 1776).

Com o aumento absurdo da quantidade de veículos automotores e consequentemente da utilização de combustíveis fósseis, fez-se necessária à avaliação de outras fontes de energia alternativa, mais rentáveis, economicamente viáveis e sustentáveis, no caso a energia eólica. Desta forma a adaptação do aerogerador em um veículo, seria algo inovador no que diz respeito à geração energética (turbina) na indústria automobilística, pois, visto que este seria um dos poucos estudos feitos, até o momento, para que se prove a eficiência ou não, deste tipo de aplicação da energia eólica.

Desde a segunda metade da década de 90, o aproveitamento eólico vem crescendo em escala cada vez maior em todo o mundo (Figura 1), isso ganhou mais força devido a criação dos acordos internacionais para diminuição da emissão de gases poluentes com a adoção do protocolo de Kyoto (ROCHA, 2008).

Figura 1 - Capacidade de energia eólica instalada mundial e acumulada



Fonte: Rocha (2008).

Então tendo em vista os carros como um dos grandes emissores de poluentes, e o mundo se unindo para diminuição desses gases, resolveu-se usar a energia proveniente dos ventos para geração de energia elétrica em veículos automotores.

Na busca de opções de sistemas de geração de energia de baixo custo, as turbinas eólicas são uma alternativa muito adequada, devido principalmente ao custo pontual baixo. Os materiais para montagem são de fácil comercialização, tornando esse sistema ideal para qualquer visionário e principalmente pessoas que se preocupem com o meio ambiente.

Este trabalho tem como premissa principal a responsabilidade ambiental, uma vez que tenta criar uma alternativa viável ao sistema de geração de energia convencional, assim como uma opção de redução de energia consumida pela bateria do automóvel. Deste modo a temática se legitima nos fatores de adequação, do vasto acervo existente sobre turbinas eólicas, para os cenários disponíveis mundialmente, ou seja, a meta a ser atingida é validação de um modelo de fácil elaboração e execução que se ajuste em diferentes modalidades de veículos proporcionando-os grande economia.

1.2. Justificativa

A principal vantagem de fontes renováveis de energia nada mais é do que a não emissão de gases poluente à atmosfera, além de sua disponibilidade infinita do produto capaz de gerar eletricidade. Rocha (2008) afirma que “Dentre as principais fontes renováveis em estudo pode-se destacar a energia eólica como aquela com boas possibilidades para gerar energia elétrica em grandes blocos, devido ao constante crescimento e desenvolvimento tecnológico que vem ocorrendo nos últimos anos em todo o mundo”.

Sendo assim espera-se que a geração de energia eólica não demore a concorrer financeiramente com outras grandes fontes de energia já utilizadas hoje.

Os combustíveis fósseis são a principal fonte energética do mundo. Seu uso provoca um grande impacto ambiental, produzindo emissões gasosas que, além de poluentes, destroem ecossistemas. O consumo de combustível fóssil é a causa primária do aumento de 30% nas concentrações do dióxido de carbono na atmosfera da terra, responsável pelo efeito estufa que provoca o aquecimento da atmosfera e poderá causar alterações climáticas importantes (CUSTÓDIO, 2009).

Com o crescimento da energia eólica, diversos projetos de pesquisa estão em andamento buscando seu aprimoramento. Os estudos incluem questões como armazenamento em épocas de baixa demanda, melhores conexões à rede energética e principalmente, o aperfeiçoamento de seus aerogeradores (SILVA, 2013).

Não há dúvida de que o custo da energia eólica hoje é maior que o de outras fontes, como a hidráulica e a térmica. Mas apesar disso a energia eólica possui aspectos muito importantes, como a segurança e a limpeza, além de ser uma energia renovável “verde” (RODRIGUES, 2004).

Um carro popular a gasolina a cada 1 km emite 150 gramas de dióxido de carbono, diferente de um metrô que libera apenas 12 gramas, segundo o G1 (2014) o Brasil já tem um automóvel para cada 4,4 habitantes. São 45,4 milhões de veículos do tipo, ou seja, são aproximadamente 6,81 milhões de kg de dióxido de carbono a cada 1 km.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar a utilização de aerogerador de eixo horizontal na geração de energia elétrica para veículos automotores.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Analisar o princípio de funcionamento de um gerador elétrico e por consequência de uma turbina eólica, além do funcionamento do sistema elétrico de um veículo automotor.
- Projetar uma microturbina para adaptar em um veículo.
- Acoplar o aerogerador no automóvel a fim de conseguir carregar o corpo bateria do mesmo, e poder estimar o tempo de carga da bateria a partir da geração de energia pela turbina.
- Gerar o mínimo de energia para utilização no sistema elétrico de um automóvel.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos históricos da energia eólica

A energia eólica tem origem na energia solar, e é uma forma de energia cinética produzida pelo aquecimento de diferentes massas de ar, originando uma variação da massa específica e gradientes de pressão, fazendo com que surjam os ventos (GIPE, 1995 apud MACHADO *et al*, 2015 p.15).

Alem disso, também é influenciada pelo movimento de rotação da Terra sobre o seu eixo e depende significativamente de influencias naturais, como: idade continental, maritimidade, latitude, altitude. As formas de aproveitamento dessa energia estão associadas a conversão da mesma em energia mecânica e elétrica. (CHESF-BRASCEP, 1987 apud MACHADO *et al*, 2015 p.15)

A força dos ventos já é conhecida e utilizada pelo homem há bastante tempo. Desde a antiguidade o homem já aproveitava esse recurso para girar as pás de moinhos, mover embarcações a vela e, assim, obter energia eólica. Nos dias de hoje esse tipo de energia é estudado para gerar eletricidade. Segundo Rodrigues (2011) Atualmente, já existem no mundo cerca de 20 mil geradores que produzem eletricidade a partir da força do vento.

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 A.C.. (CRESESB, 2008)

Esse tipo de moinho de eixo vertical veio a se espalhar pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos. Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China (por volta de 2000 A.C.) e o Império Babilônico (por volta 1700 A.C) também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação (CHESF-BRASCEP, 1987 e SHEPHERD, 1994 apud CRESESB, 2008)

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. Em 1991, a Associação Europeia de Energia Eólica estabeleceu como metas a instalação de 4.000 MW de energia eólica na Europa até o ano 2000 e 11.500 MW até o ano 2005 (ANEEL, 2002).

[...] Estima-se que em 2020 o mundo terá 12% da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200GW (WINDPOWER; EWEA; GREENPEACE, 2003; WIND FORCE, 2003 apud ANNEL, 2002).

Para ANNEL (2002) Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. O custo dos equipamentos, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas.

Com o passar dos anos o interesse do homem por este tipo de energia limpa e renovável favorece com que evoluísse de forma grandiosa, por meio de pesquisas e elaboração de projetos, o que garante hoje repleta expansão deste tipo de tecnologia e por fim grande aproveitamento em vários setores.

2.2. Organização de Capítulos

No Capítulo 1 são apresentadas a introdução, as justificativas e os objetivos deste projeto.

O Capítulo 2 mostra um breve histórico do uso da energia eólica no mundo.

No Capítulo 3 apresenta-se o estado da arte de turbinas eólicas no qual se mostram algumas de suas configurações e as suas principais características de funcionamento.

No Capítulo 4 realiza-se a discriminação de conceitos, a determinação e avaliação dos parâmetros aerodinâmicos da turbina eólica utilizada, além da projeção da pá.

O Capítulo 5 apresenta os aspectos elétricos do rotor para a conversão da energia mecânica do movimento das pás eólicas em energia elétrica. Além disto, o sistema experimental e os seus componentes também são descritos.

No Capítulo 6 é apresentada a metodologia, ou seja, as etapas para construção do projeto

O Capítulo 7 trata da prototipagem mostrando principalmente a forma pela qual chegou-se a adaptação do ventilador de teto à turbina eólica do experimento.

No Capítulo 8 são evidenciados os resultados do sistema eólico para diferentes condições e são discutidas as características operacionais do mesmo.

Finalmente, no Capítulo 9, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO III

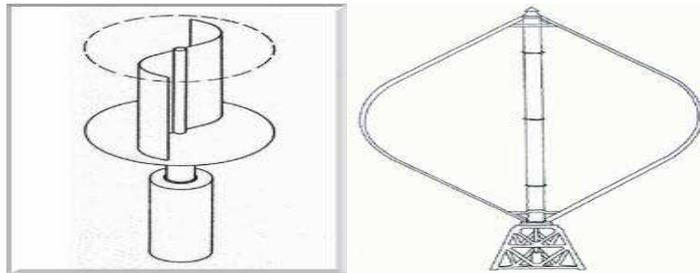
3. TURBINAS EÓLICAS/AEROGERADORES

3.1. Princípio Básico de Funcionamento

A energia eólica é resultado do aquecimento da atmosfera proveniente do sol. Com isso as massas de ar que se formam passam pelas pás do aerogerador eólico, ocasionando assim sua rotação, devido ao diferencial de pressão, assim chamado de sobrepressão e depressão, que em aeronaves faz com que elas flutuem. Contudo, temos aerogeradores de eixo vertical e eixo horizontal que se diferenciam por sua geometria, construção, forma de captação do vento e sua utilização.

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças atuantes. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (lift) e por forças de arrasto (drag). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são Darrieus e Savonius. (CRESESB, 2008)

Figura 2 - Exemplos de turbinas (da esquerda para a direita: Savonius e Darrieus)



Fonte: CRESESB (2008).

Os aerogeradores de eixo horizontal são os mais conhecidos e os mais utilizados pela sua maior eficiência, compensando o seu custo maior. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (lift) e forças de arrasto (drag). Um corpo que obstrui o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arraste). Os principais tipos de aero geradores de eixo horizontal são o Múltiplas e o Tripás (CRESESB, 2008).

Um aerogerador é um sistema capaz de gerar energia elétrica a partir da energia cinética contida no fluxo de ar. Os aerogeradores de maior instalação no mundo são do tipo de eixo horizontal, com turbinas eólicas de três pás. Esse conceito básico de aero gerador tem grande aceitação devido que fornece um equilíbrio entre desempenho aerodinâmico, esforços mecânicos e vida útil, levando à diminuição do custo global por MW-h gerado (BURTON et al., 2001 apud TARNOWSKI, 2006 p.23).

Durante o funcionamento normal, os atuais aerogeradores aproveitam a potência instantânea fornecida pelo vento. Sendo assim, a potência elétrica gerada tem aproximadamente as mesmas características de variação da potência do recurso eólico, o qual é significativo, pois a potência destes recursos depende do cubo da velocidade do vento.

A velocidade de rotação nominal de uma turbina eólica é relativamente baixa, devendo ser adaptada com a velocidade de rotação nominal do gerador. Essas velocidades dependem, no caso da turbina, da área varrida pelas pás e do regime de ventos (o que determina a capacidade de geração); no caso do gerador, do número de polos e da frequência da rede, (TARNOWSKI, 2006).

3.1.1. Aerodinâmica da Turbina

As pás, denominadas por hélices, é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica. Por este motivo, sua configuração influencia diretamente no rendimento global do sistema, sendo o componente mais característico de um sistema eólico (BENITO, 2012). As pás distinguem-se por um conjunto de características, sendo as mais importantes:

- O comprimento que determina a área varrida pelo rotor.
- O perfil das pás que é semelhante ao perfil das pás aeronáuticas.
- A largura que é determinada pelo comprimento da corda do perfil
- (Afeta a velocidade de arranque).
- A corda (distância entre os pontos extremos do perfil).
- O ângulo que forma a corda do perfil e a direção da corrente de ar.

3.1.2. Perfil Alar

Perfil alar é a secção obtida por um corte transversal da pá (RODRIGUES, 2004). Sobre o perfil (Figura 3) são geradas forças de sustentação, perpendicular ao vento incidente, e que origina o movimento da pá, e a força de resistência (ou arrasto) com a massa de ar, que trava o movimento. A força produzida advém então da diferença de pressão criada entre o extradorso - região de baixa pressão e o intradorso - região de alta pressão (parte inferior da pá).

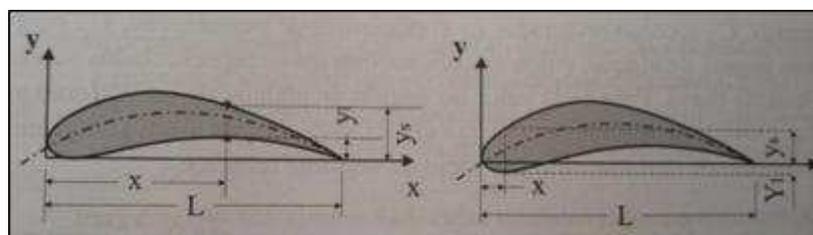
Figura 3 - Representação de um perfil alar



Fonte: Rodrigues (2004)

Segundo Henn (2006), as formas dos perfis alares das pás são normalmente indicadas através de códigos desenhados para a indústria aeronáutica, onde tabelas fornecidas por laboratórios aerodinâmicos auxiliam a tarefa de desenhar. Dentre esses perfis, destacam-se o NACA, ensaiados nos Estados Unidos da América e o GÖTTINGEN, ensaiados na Alemanha. Estes dois distinguem-se basicamente por suas convenções (Figura 4).

Figura 4 - Convenção GÖTTINGEM (esquerda) e NACA (direita)



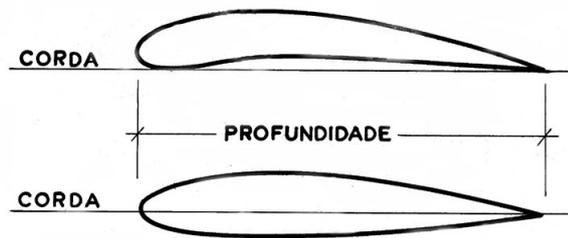
Fonte: Henn (2006)

3.1.3. Características Geométricas

As principais características geométricas de um perfil que, no nosso caso, interessa definir, são: a corda, a linha média e a espessura máxima relativa.

CORDA – É uma linha que une o bordo de ataque ao bordo de fuga. Nos perfis, cujo intradorso seja côncavo ou plano, a corda é construída por uma reta tangente ao ventre do perfil. A distância que vai do bordo de ataque ao bordo de fuga, medida sobre a corda, define a profundidade do perfil (Rodrigues, 2004).

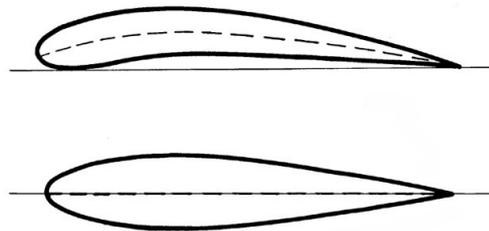
Figura 5 - Corda de um perfil



Fonte: Rodrigues (2004).

LINHA MÉDIA – É a linha cujos pontos ficam equidistantes do extradorso e intradorso fig 6. Nos perfis biconvexos simétricos, a linha média confunde-se com a corda, como se depreende facilmente.

Figura 6 - Linha média de perfil



Fonte: Rodrigues (2004).

ESPESSURA MÁXIMA RELATIVA – É a relação entre a altura máxima do perfil (Y_1) e a profundidade (T).

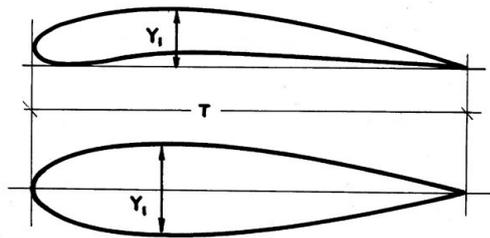
$$\text{Esp. Máx. Rel.} = Y_1 / T \quad (1)$$

Quanto à espessura máxima relativa, os perfis se encontram em três classes diferentes, dependendo qual seja as condições em que o projeto será submetido:

Finos, semiespessos e espessos.

Os perfis finos são aqueles cuja espessura máxima relativa não ultrapassa 7 %, perfis semiespessos são os de espessura compreendida entre 7 % e 14 % e perfis espessos os que ultrapassam os 14 % (Rodrigues, 2004).

Figura 7 - Espessura do perfil



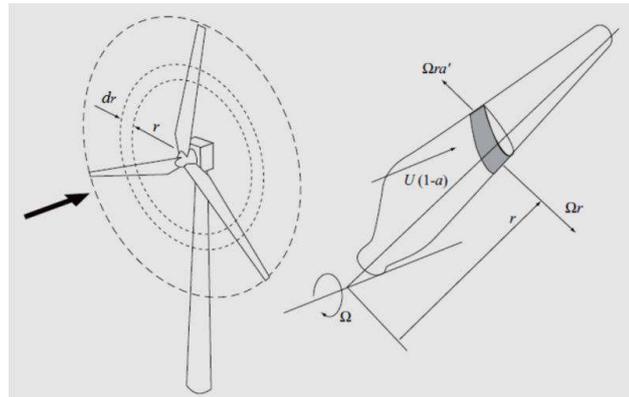
Fonte: Rodrigues (2004).

3.1.4. Forças Aerodinâmicas

Segundo Rocha (2008), as turbinas de arraste são caracterizadas devido a força de o vento empurrar as pás forçando o rotor a girar. Possuem utilidades em áreas rurais, para bombeamento de água com ventos de baixa velocidade. Utilizamos essa função para adequar ao projeto pretendido de pequeno porte, mas com eficiência capaz de obter um resultado satisfatório.

Ainda Rocha (2008), nas turbinas de sustentação (Figura 8), o vento ao passar com maior velocidade sobre o lado mais longo formado pela forma da superfície da pá, com isso gerando uma área de baixa pressão e a diferença de pressão gerada entre as duas superfícies resulta em uma força de sustentação. No caso da asa de avião, isto ocasiona uma força de elevação permitindo que o mesmo se mantenha no ar, mas no caso das pás da turbina, que são fixadas pelo cubo para se mover em um plano, a força de sustentação irá ocasionar sua rotação, pois nesse caso as pás estão atreladas ao solo por uma haste.

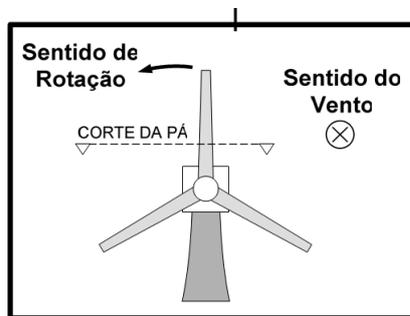
Figura 8 - Turbina em operação



Fonte: Rocha (2008)

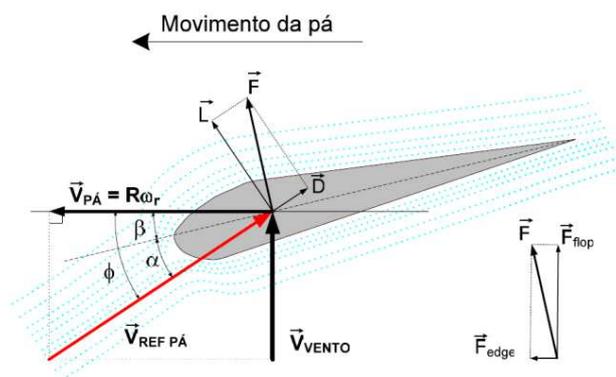
A figura 9 representa a vista frontal de uma turbina eólica em operação, onde é destacado o sentido do vento (barlavento) e o sentido de rotação para a observação do corte de seção transversal de uma pá do rotor.

Figura 9 - Vista frontal de um aerogerador em movimento para observação do corte



Fonte: Rocha (2008).

Figura 10 - Diagrama de velocidades e forças atuantes sobre as pás da turbina



Fonte: Rocha (2008).

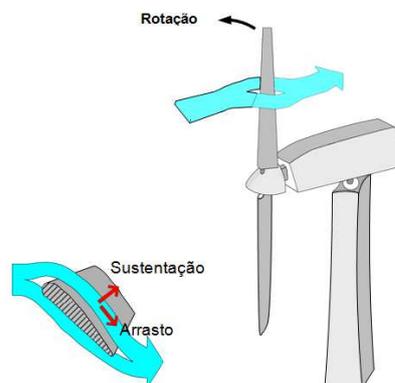
Tanto o perfil como a construção, afetam diretamente na forma como as forças vão atuar sobre uma pá eólica, deixando assim bem claro que o seu desempenho depende diretamente dessas variáveis. Contudo, ainda depende de quanto de resultado pretende-se obter de um aro gerador e em quais regimes o mesmo irá o operar.

3.2. Aerogerador de Eixo Horizontal

Os rotores de eixo horizontal no decorrer do vento (aerogeradores convencionais) são em sua totalidade movidos por forças de sustentação e obrigatoriamente tem que possuir mecanismos capazes de permitir que o disco formado pela área varrida pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás (multivane fans). Em sua construção as pás podem ter as mais diferentes formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada que para este projeto sendo empregada esta última citada (CRESESEB, 2008).

As Turbinas eólicas de eixo horizontal são as mais usadas e conhecidas no mercado, e sua característica principal a necessidade de um sistema que posicione o rotor na direção predominante de vento. Elas extraem com maior eficiência a energia do vento, se comparadas às TEEV's (Turbina Eólica de Eixo Vertical). Os rotores de uma turbina de eixo horizontal são classificados de acordo com sua orientação em relação ao vento (que pode ser downwind ou upwind), número de pás, sistema de controle (pitch ou stall) e a forma com que se alinham à direção do vento (ativo ou passivo). As maiorias de seus sistemas mecânicos e elétricos estão instalados no nível do eixo de rotação (MACHADO, 2014).

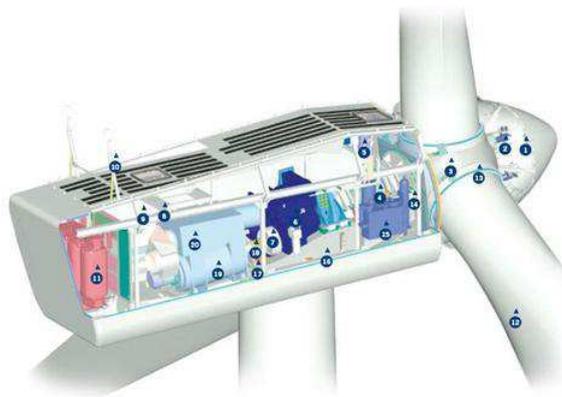
Figura 11 - Turbina de sustentação



Aqui temos claramente um exemplo de como uma turbina eólica de eixo horizontal se comporta quando submetida a forças de sustentação e arrasto, ocasionando assim sua rotação devida sua fixação por uma haste e diferença de pressão, daí pois, surgindo a necessidade do controle de passo para ajustar a turbina a direção o vento, contudo este projeto dispensará esse dispositivo, uma vez que teremos massas de ar constante em uma única direção.

À exceção do motor de guinada, todos os componentes de uma turbina horizontal ficam situados no interior da nacele. Figura a seguir os mostra em detalhe. A altura da torre tem importância adicional, já que é preciso elevar o rotor acima da camada limite, para obter-se um escoamento de corrente livre laminar e bem desenvolvido, onde há maior movimentação das moléculas de ar para proporcionar a inércia necessária para rotação (SILVA, 2013).

Figura 12 - Nacele



Fonte: CRESESB (2008).

3.3. Aerogerador de Eixo Vertical

As turbinas de eixo vertical possuem variadas vantagens tais como: não necessita de mecanismo de orientação conforme o vento, tal como na de eixo horizontal, e possibilita a instalação da caixa de engrenagens no solo. Porém sua potência de saída não pode ser facilmente controlada em ventos de alta velocidade simplesmente mudando a inclinação da pá, por isso atualmente elas desempenham um papel secundário (ROCHA, 2008).

As TEEV's (Turbina Eólica de Eixo Vertical) podem ser movidas por forças de sustentação e de arrasto. Forças de sustentação são forças as quais um corpo está submetido

quando sobre um fluxo de ar, na direção perpendicular, ou seja, ângulo de 90° no qual resulta no nível de ruído e vibração do aerogerador. Já as forças de arrasto, atuam em linhas paralelas à direção do fluxo de ar, na qual precisa-se de uma aerodinâmica fuselada para evitar o máximo da arrasto possível (MACHADO, 2014).

Turbinas de eixo vertical consistem de uma superfície vertical em forma de S com rotação em torno de um eixo central. Têm em geral pouca capacidade e eficiências menores em comparação com turbinas horizontais como citado anteriormente, apesar da maioria dos seus componentes serem os mesmo da TEEH. Sendo mais utilizadas para aplicações de baixa potência (SILVA, 2013).

Figura 13 - Turbina Eólica de Eixo Vertical - TEEV



Fonte: Wenzel (2007)

CAPÍTULO IV

4. CONFIGURAÇÃO AERODINÂMICA

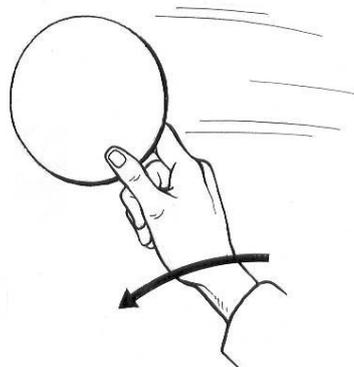
4.1. Resistência do ar

Como se opera essa resistência?

O ar é um gás e, como todos os gases, compõe-se de um agregado de pequenas partículas, a que se chamam moléculas. Quando fazemos deslocar no ar qualquer objeto, as moléculas do ar têm de desviar-se, afastando-se umas das outras para dar passagem ao corpo, visto que não podem passar através dele. Assim, por exemplo, se fizermos deslocar no espaço um disco de cartão como mostra a figura 14, notamos imediatamente que, para o fazermos avançar, teremos de empregar uma certa força (RODRIGUES, 2004).

Experimentos em mecânica dos fluidos mostram que a velocidade de um fluido que escoia próximo a uma superfície é nula em função do atrito entre o ar e a superfície do solo. Ao analisar o perfil de velocidade deste fluido com a altura, verifica-se que, no sentido perpendicular à altura, a velocidade passa de um valor nulo e atinge uma velocidade de escoamento U . Esta mudança é mais acentuada próxima à superfície, e menos acentuada em grandes alturas. A pressão que notamos no disco não é mais do que a força que foi necessário dispender para desviar o ar à passagem do corpo, separando as suas moléculas. O disco, no seu movimento, separa, portanto as partículas do ar, obrigando-as a contornar o obstáculo até aos bordos e a juntarem-se de novo na face posterior (MACHADO, 2014).

Figura 14 - Força aplicada sobre o disco



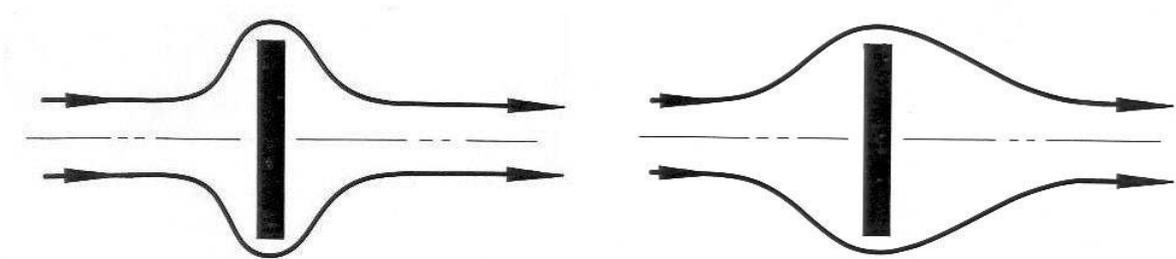
Fonte: Rodrigues (2004).

1 cm³ de ar contém aproximadamente 30 000 trilhões de moléculas.

Sabe-se que um automóvel, em determinada velocidade, não pode descrever uma curva muito apertada. Assim, também as moléculas do ar em virtude da velocidade do movimento, não se desviam em ângulo reto, mas começam a contornar o disco antes de o tocarem, pois há espaço atrás do mesmo que precisa ser preenchida, descrevendo curvas suaves, figura 15.

Todavia, nós sabemos que, à medida que a velocidade do automóvel aumenta, a curva por ele descrita terá de ser mais aberta. Assim, também, se aumentarmos a velocidade do disco, as moléculas do ar começarão a separarem-se muito antes de o atingirem e a juntarem-se mais adiante também. (Fig. 15)

Figura 15 - Resistência do ar sobre o disco

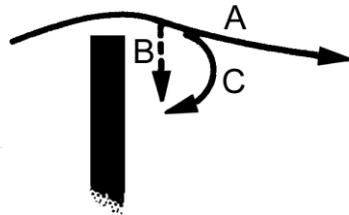


Fonte: Rodrigues (2004).

Ocorre então perguntar se, na zona central, se estabelece um vazio, já que ela não é preenchida pela veia fluida.

É isso, na realidade, que tenderia a acontecer; contudo, como não é possível a existência de duas zonas definidas, uma de alta pressão, outra de muito baixa pressão, sem que se misturem, elas tendem a equiparar-se. O que existe, portanto, é um movimento, no sentido de fora para dentro, tendente a encher o vazio, que, combinando com a deslocação do ar, dá origem a um movimento curvilíneo, como representa a figura 15. Assim, geram-se, atrás do disco, movimentos desordenados de ar – a que se chamam turbilhões –, a fim de efetuar a necessária mistura do ar, que corre à volta do disco, com o que se encontra na face posterior (RODRIGUES, 2004).

Figura 16 - Movimento do ar sobre a superfície



A – Movimento do ar

B – Movimento tendente a encher o vazio

C – Movimento resultante

Fonte: (Rodrigues, 2004).

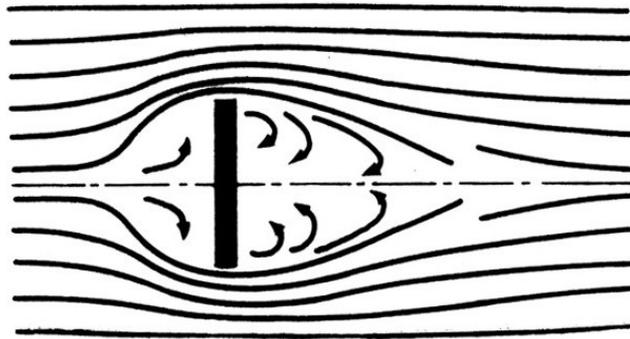
Consideremos agora o disco na câmara de provas de um túnel, sujeito a uma corrente de ar, e estudemos o seu espectro aerodinâmico (fig. 17).

As partículas de ar que, como já atrás se enunciou, tendem a percorrer trajetórias retilíneas e paralelas, ao encontrarem o obstáculo são obrigadas a contorná-lo até aos bordos e a precipitarem-se na face posterior em movimentos turbulentos, criando reações no disco. À frente, forma-se uma pressão, porque, para obrigar o ar a desviar-se do seu caminho normal, é necessário que o disco exerça sobre ele uma certa força, que se traduz num aumento de pressão no ar (RODRIGUES, 2004).

Conforme o ar passa pelo disco do rotor, por projeto há uma queda na pressão estática, de forma que logo após o rotor, o ar tem pressão abaixo da atmosférica. O ar então prossegue na superfície com velocidade e pressão reduzidas, configurando a região da esteira. Eventualmente, longe do rotor, a pressão estática da esteira retorna à pressão atmosférica para que o equilíbrio seja atingido. O aumento de pressão se deve à energia cinética, causando uma desaceleração adicional. Portanto, entre a entrada e saída do volume de controle, não há nenhuma mudança de pressão, mas apenas uma variação de energia cinética (SILVA, 2013).

Esta força que o ar exerce sobre o disco é igual à força que o disco exerce sobre o ar, embora de sentidos opostos. À primeira – à reação do ar sobre o disco – chama-se resistência do ar. A segunda – a ação do disco sobre a veia fluida – representa a força que é necessário aplicar no disco para o fazer deslocar no ar, dessa forma sua estrutura influencia diretamente nessa resistência.

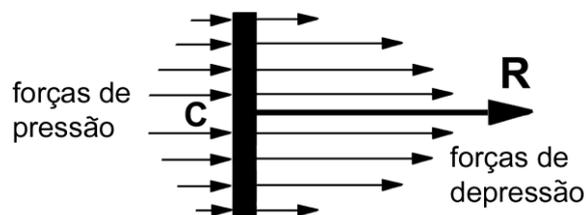
Figura 17 - Espectro aerodinâmico do disco



Fonte: (Rodrigues, 2004).

Como se vê pela figura 18, que representa a distribuição de pressões a disposição das forças faz-se equitativamente em volta do centro C , e compreende-se porquê, dado o aspecto simétrico da passagem do ar em torno do disco.

Figura 18 - Distribuição e resultante das pressões sobre o disco



Fonte: (Rodrigues, 2004).

Portanto, a resultante R está aplicada no ponto C , com a mesma direção do deslocamento e de sentido inverso. A forma do espectro aerodinâmico de um disco é semelhante, quer seja de grandes dimensões, ou de proporções reduzidas. Assim, a distribuição de pressões será equilibrada para ambos. Sabendo-se que a força R é igual à diferença de pressões vezes a área do disco, a resistência do ar será, portanto, proporcional a essa área (Rodrigues, 2004).

Dessa forma pode-se dizer que a resistência do ar, para qualquer corpo, tem sua variação de acordo com a área frontal do mesmo, tal como o bico de uma aeronave que apresenta perfil fuselado, ou seja, sua estrutura geométrica diminui o atrito com o ar e assim diminui a resistência, permitindo um escoamento mais suave do fluido. Partindo ainda do princípio de que a resistência é a força igual ao produto da diferença de pressões área frontal – quanto menor for essa diferença menor será também a resistência.

Entende-se por distribuição de pressões a representação gráfica das pressões negativas (forças de depressão); pressões positivas (forças de pressão), que atuam no corpo. A área frontal é a superfície da maior seção perpendicular.

Pela conservação do momento angular, a interação entre o disco em movimento e o escoamento faz com que a esteira gire no sentido contrário ao do rotor. Sendo assim, o incremento do torque do rotor que atua sobre o anel será responsável por transferir a velocidade tangencial do ar enquanto a força axial agindo sobre o anel implicará na redução da velocidade axial (ALMEIDA, 2013).

Verifica-se, pois, que a resistência do ar varia com a distribuição de pressões. Já vimos que a pressão aparece da necessidade que o ar tem de se desviar ao aproximar-se do disco. Portanto, do mesmo modo que o automóvel vira mais facilmente ao descrever uma curva de grande raio, também o ar ficará sujeito a uma pressão tanto menor quanto mais suave for a curvatura das linhas de corrente.

Por motivo idêntico, depois de passar o disco, também quanto mais aberta for a curvatura das linhas de corrente, menor será a depressão e a tendência a formar turbilhões. Assim, as formas que determinarem a menor curvatura da veia fluida serão as mais aerodinâmicas, porque, para a mesma área frontal e para a mesma velocidade, estabelecem a menor diferença de pressões.

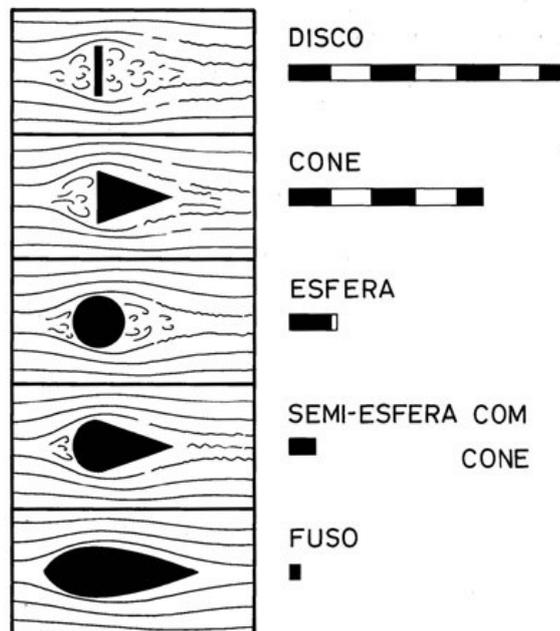
No que respeita à velocidade, outro fator fundamental da resistência do ar, é lógico admitir que, quanto mais elevada ela for, maior dificuldade haverá em obrigar o ar a adaptar-se aos corpos que se deslocam no seu seio. E assim é: quanto maior for a velocidade, maiores serão as forças de inércia das moléculas de ar, maiores terão de ser, pois, as forças de reação do corpo sobre o ar e, portanto, a resistência do ar (RODRIGUES, 2004).

Sabendo-se que as forças de inércia variam com o quadrado da velocidade, teremos de concordar que a resistência do ar é proporcional ao quadrado da velocidade.

Resumindo, podemos afirmar que a resistência do ar varia:

- 1) Com a área frontal;
- 2) Com a distribuição de pressões que, por sua vez, varia com a forma e com a velocidade. Ainda no que respeita à forma dos corpos, transcreve-se a seguir um quadro do valor relativo da resistência para diversos sólidos do mesmo diâmetro, com os respectivos espectros aerodinâmicos.

Figura 19 - Valor relativo da resistência para diversos sólidos do mesmo diâmetro



Fonte: (Rodrigues, 2004).

Outro fator de grande importância é o perfil de velocidades que resulta da adição do cone à entrada do volume de controle, definida pelo plano do disco atuador. É importante realçar as restrições assumidas neste parâmetro, onde foi assumido um escoamento bidimensional, sem considerar a componente radial da velocidade induzida, e sem o efeito viscoso do cone, o que simplifica muito o cálculo, sacrificando um pouco a precisão. Verifica-se que, de um modo geral, à medida que os corpos vão sendo alongados, o comportamento das partículas de ar se torna menos turbulento, obtendo-se trajetórias quase regulares da veia fluida no caso da forma fuselada (FIGUEIREDO, 2010).

Aliás, se observarmos o espectro aerodinâmico do disco, verificamos que a zona turbulenta tem sensivelmente a forma de um corpo fuselado. Na realidade, esta forma, muito característica nos aviões, por ser a que cria menor resistência ao avanço, foi obtida pelo preenchimento da zona de turbulência criada em redor do disco. Ela permite que as partículas de ar se desviem à frente, sem virarem violentamente, ao aproximarem-se do corpo, e o contornem de uma forma suave, unindo-se de novo sem movimentos desordenados (RODRIGUES, 2004).

A forma fuselada é, pois, a mais racional a dar aos corpos que se desloquem inteiramente na atmosfera.

Procuramos, agora, de acordo com o que fica dito, a expressão matemática da resistência do ar.

1) A resistência é proporcional à superfície:

$$R = K_1 \cdot S \quad (2)$$

2) A resistência é proporcional às forças de inércia que, por sua vez, são iguais à pressão dinâmica:

$$R = K_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (3)$$

Em que ρ é a densidade do ar e V a velocidade;

3) A resistência depende da forma, e arbitrou-se como coeficiente de forma o coeficiente de proporcionalidade entre a resistência e $S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$

Logo,

$$R = K \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (4)$$

Expressando a resistência em kg, a superfície em m^2 e a velocidade em m/s, vem:

$$R = K \frac{S \cdot V^2}{16} \quad (5)$$

Para o valor de ρ ao nível do mar, temperatura de 15 °C e pressão de 760 mm de mercúrio (atmosfera padrão).

O coeficiente de forma, para aeromodelos de contornos aerodinâmicos, pode considerar-se aproximadamente igual a 0,1.

No caso do disco, o valor K atinge 0,66; no caso do cilindro, 0,5; da esfera, 0,11 e do corpo fuselado, 0,05.

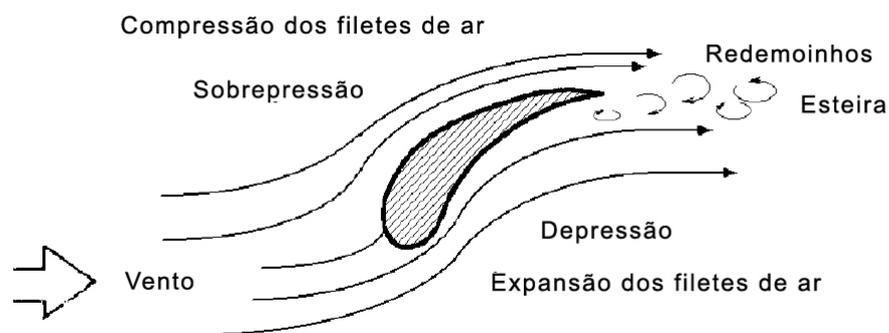
4.2. Forças sobre um perfil

Um objeto situado no seio de uma corrente apresenta uma resistência ao avanço, deformando os filetes fluidos. Isto depende da forma do objeto e de sua posição em relação ao vento, figura 20. Ao estudar os efeitos da resistência do ar sobre um placa plana, observa-se que a resultante (\vec{R}) das forças aplicadas a placa é um vetor cujo ponto de aplicação é o centro aerodinâmico, sendo sua direção perpendicular a placa, seu sentido é o do vento, e a sua intensidade é proporcional a superfície S exposta e ao quadrado da velocidade do vento v na forma:

$$R = C_W \cdot \rho \cdot \frac{Sv^2}{2} = k \cdot S \cdot v^2 \quad (6)$$

Onde k é um coeficiente que depende do ângulo de incidência α , das unidades escolhidas e da turbulência do movimento. C_W é o coeficiente de resistência (penetração), ρ é a densidade do ar e S a seção frontal do perfil.

Figura 20 - Perfil situado no seio de uma corrente fluida



Fonte: Díez (2003).

Se o ângulo α que forma o plano da placa com a direção do vento é grande, existe caráter turbulento, figura 21. Se o ângulo de incidência α é pequeno, a sobrepressão aparece na parte inferior da placa e a depressão em cima da mesma, de forma que aparece uma força que tende a eleva-la figura 21, conhecida como força de sustentação ou de elevação. Para perfis planos de comprimento L paralelos a velocidade do vento v , o valor do número de Reynolds é:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (7)$$

O valor de C_w é dado por:

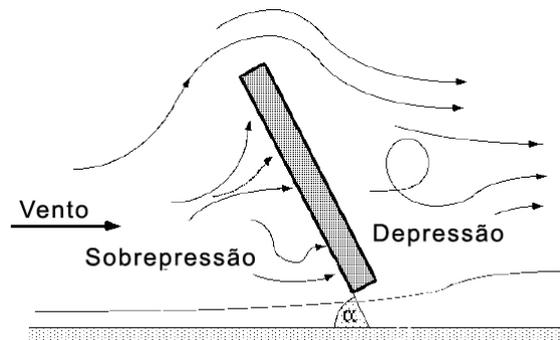
Regime laminar:

$$C_w = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}; Re < 10^5 \quad (8)$$

Regime turbulento:

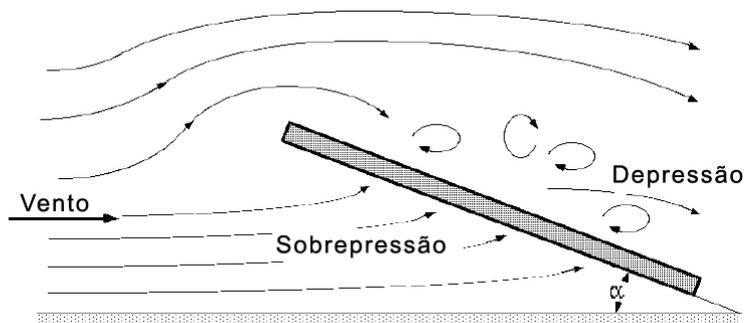
$$C_w = \frac{0,074}{1}; 10^5 < Re < 10^7 \quad (9)$$

Figura 21 - Forças de sustentação em um perfil com grande inclinação



Fonte: Díez (2003).

Figura 22 - Forças de sustentação em um perfil com pequena sustentação



Fonte: Díez (2003).

4.3. Forças de arrasto e sustentação em perfis fixos

A Componente de (\vec{R}) na direção do vento é a força de arrasto F_D , ao mesmo tempo em que a componente R perpendicular à força de arrasto é a força de sustentação F_L .

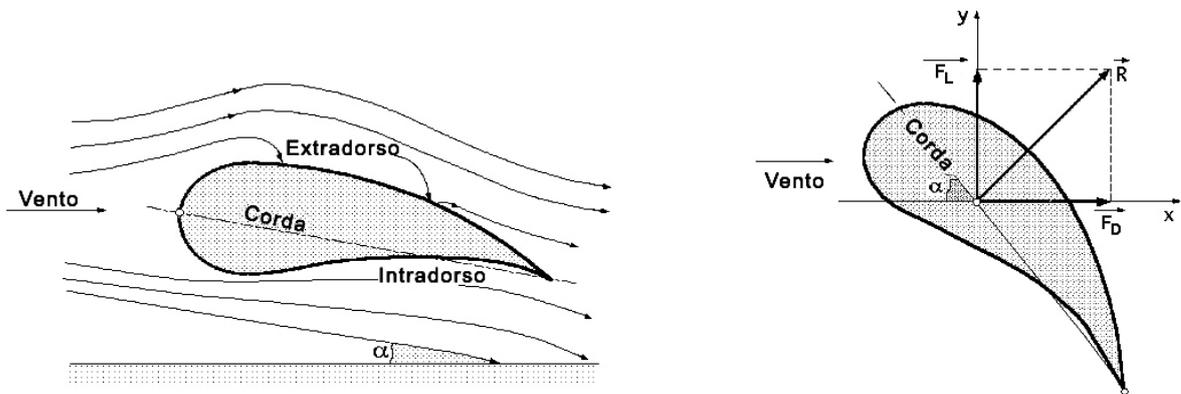
F_D

$$F_D = R \sin \alpha = k_x S v^2 \quad (10)$$

$$F_L = R \cos \alpha = k_y S v^2 \quad (11)$$

A força (\vec{R}) é sempre normal a corda do perfil, que é ao mesmo seu comprimento característico. A força de sustentação aumenta à medida que α diminui. Considera-se a corda a partir do bordo de ataque até o bordo de fuga. Se a forma do perfil não é plana, pode-se decompor (\vec{R}) em função de dois tipos de coeficiente (k_x) de arrasto e (k_y) de sustentação, sendo o eixo x paralelo a direção do vento, figura 23 (Díez, 2003)

Figura 23 - Coeficiente de arrasto e sustentação



Fonte: Díez (2003).

4.4. Escolha e desenho do perfil

Um perfil desenha-se de acordo com a tabela fornecida pelo respectivo laboratório aerodinâmico. Deve depositar-se nesse trabalho o maior rigor, pois o rendimento da asa irá depender, em grande parte, da precisão e fidelidade com que se tiverem efetuado os cálculos para a construção do perfil.

A tabela de um perfil compreende três ordens de valores, assinaladas, respectivamente, por: X (percentagens da corda), Y1 (linha do extradorso) e Y2 (linha do intradorso).

Para que melhor se possa compreender o modo como devem interpretar-se esses valores e como se devem utilizar para desenhar o perfil, vejamos com um exemplo como se procede praticamente, em face da tabela dada. Numa folha de papel milimétrico, marcamos uma reta, de comprimento igual à profundidade do perfil que pretendemos obter. Para esse projeto o perfil escolhido é o Gottingen 602, com um comprimento de 20 cm.

Tabela 1 - Tabela do perfil GOTTINGEN 602

X	0	1,25	2,5	5	7,5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	95	100
Y1	2,5	4,0	4,85	6,2	7,05	7,75	8,8	9,45	-	10,0	9,8	9,1	8,0	6,55	4,75	2,55	1,35	0
Y2	2,5	1,48	1,15	0,75	0,5	0,4	0,2	0	-	0,4	0,65	1,0	1,25	1,15	1,0	0,6	0,3	0

Fonte: Rodrigues (2004).

Começamos por traçar uma linha com 200 milímetros de comprimento e tiramos em seguida perpendiculares nos pontos determinados pelas cotas X. Esses pontos obtêm-se multiplicando a cota pela profundidade do perfil e dividindo por 100. Assim, por exemplo, para o segundo valor de X, teremos:

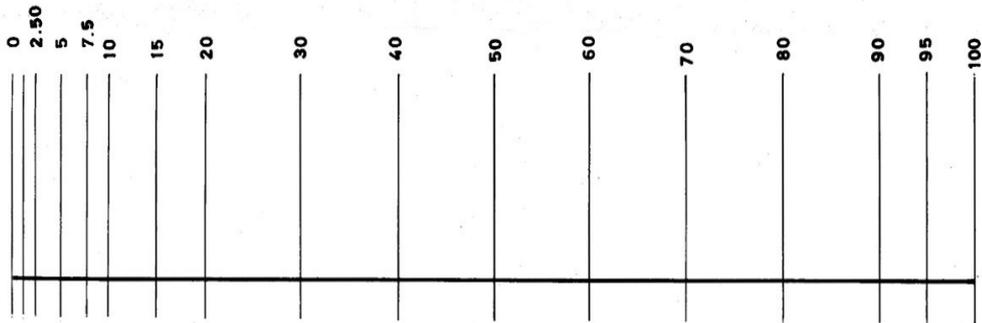
$$X = \frac{1,25 \times 200}{100} = 2,5 \text{ mm} \quad (12)$$

O segundo ponto ficará, pois a 2,5 mm do início da linha.

O terceiro ponto obter-se-á do mesmo modo, isto é, multiplicando a cota 2,5 por 200 e dividindo por 100. O resultado (5 mm) determina o local onde se traça a terceira perpendicular.

E assim se procederá para todos os valores de X, até 100.

Figura 24 - Dimensões do perfil no eixo x



Fonte: Autor (2016).

Traçadas na corda do perfil as perpendiculares, sobre as quais vão ser marcados os pontos correspondentes às cotas Y1 e Y2, vejamos onde se inscrevem esses pontos, que irão definir as linhas do extradorso e intradorso.

Para obter o primeiro valor de Y1 multiplicamos o valor indicado na tabela (2,5) pela corda e dividimos por 100. Assim:

$$Y1 = \frac{2,5 \times 200}{100} = 5,0mm \quad (13)$$

Na primeira perpendicular marcamos, pois acima da linha de corda, um ponto, à distância de 5 mm.

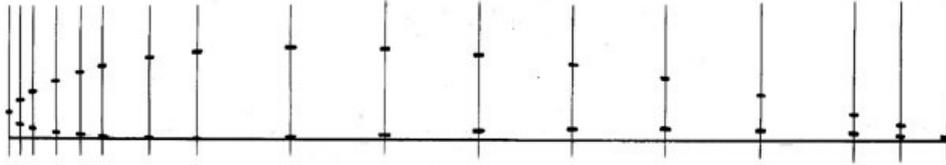
Tabela 2 - Tabela com as dimensões da pá

X	0	2,5	5	10	15	20	30	40	50	60	80	100	120	140	160	180	190	200
Y1	5	8	9,7	12,4	14,1	15,5	17,6	18,9	-	20	19,6	18,2	16	13,1	9,5	5,1	2,7	0
Y2	5	2,96	2,3	1,5	1	0,8	0,4	0	-	0,8	1,3	2	2,5	2,3	2	1,2	0,6	0

Fonte: Autor (2016).

Com as coordenadas já determinados, serão marcados com pontos e em seguida desenhado o perfil unindo esses pontos, como mostra as figuras a seguir.

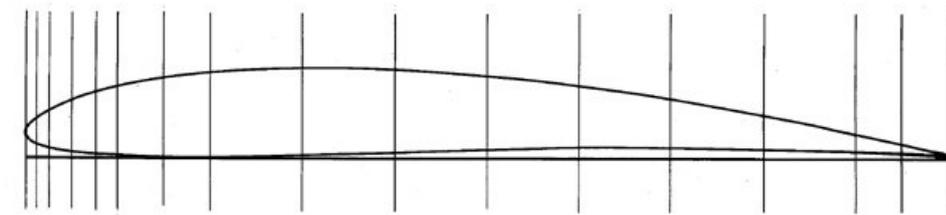
Figura 25 - Pontos do perfil



Fonte: Autor (2016).

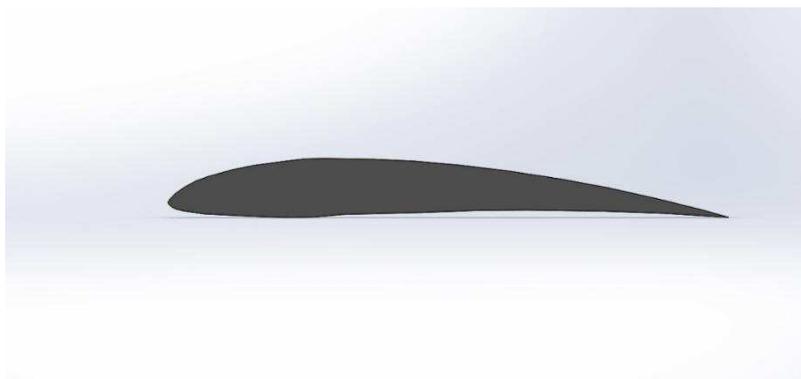
Marcando da mesma forma todas as cotas Y1 e Y2 e unindo todos esses pontos por curvas contínuas, obtêm-se, respectivamente, as linhas do extradorso e do intradorso.

Figura 26 - Perfil traçado



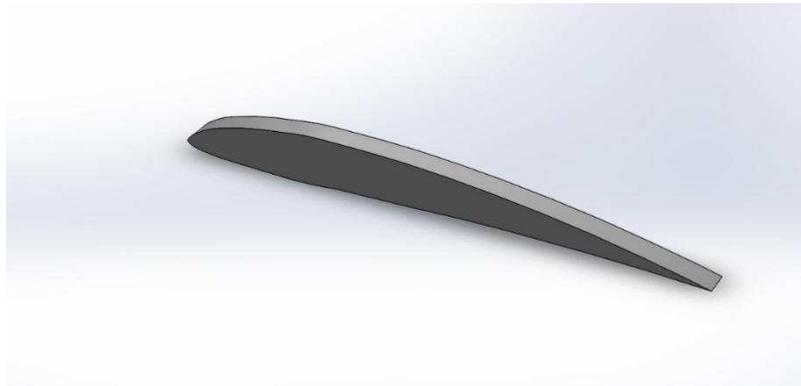
Fonte: Autor (2016).

Figura 27 - Perfil modelado no solidworks (vista lateral)



Fonte: Autor (2016).

Figura 28 - Perfil modelado no solidworks (vista isométrica)



Fonte: Autor (2016).

4.5. Determinação da potência

A energia cinética de uma massa de ar “m” em movimento a uma velocidade “v” é dada por:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (14)$$

Considerando a mesma massa de ar “m” em movimento a uma velocidade “v”, perpendicular a uma seção transversal de um cilindro imaginário (figura 29), pode-se demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela seção “A”, transversal ao fluxo de ar, é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (15)$$

Onde:

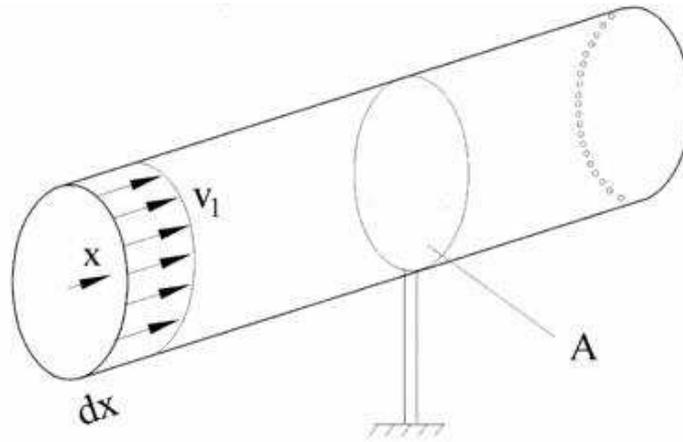
P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m^3]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [m/s]

Figura 29 - Fluxo de ar através de uma área transversal “A”



Fonte: Silva (2014).

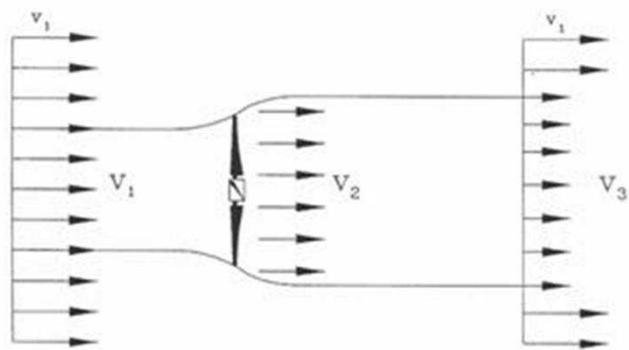
A expressão 2 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência DP , ou fluxo de potência:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (16)$$

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

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (“ c_p ” máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde “ v_1 ” representa a velocidade do vento na região anterior às pás, “ v_2 ” a velocidade do vento no nível das pás e “ v_3 ” a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 30.

Figura 30 - Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás



Fonte: Silva (2014).

Como na figura 30, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade “ V_1 ” que é retratada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade “ V_3 ” a jusante das pás. Pela lei da continuidade, temos que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (17)$$

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

$$E_{EXTRAÍDA} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (18)$$

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

$$E_{EXTRAÍDA} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2) \quad (19)$$

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades “ v_1 ” e “ v_3 ”:

- A velocidade do vento não é alterada (“ v_1 ” = “ v_3 ”): Neste caso nenhuma potência é extraída;
- A velocidade do vento é reduzida a valor zero (“ v_3 ” = 0): Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência seja retirada.

A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre v_1 e v_3 . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor v_2 é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (20)$$

Pelo Teorema de Rankine - Froude, pode-se assumir que a relação entre as velocidades “ v_1 ”, “ v_2 ” e “ v_3 ” é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (21)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 20 e a velocidade “ v_2 ” apresentada na equação 21 forem inseridas na mesma equação 19, tem-se:

$$E_{EXTRAÍDA} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (22)$$

Onde:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (23)$$

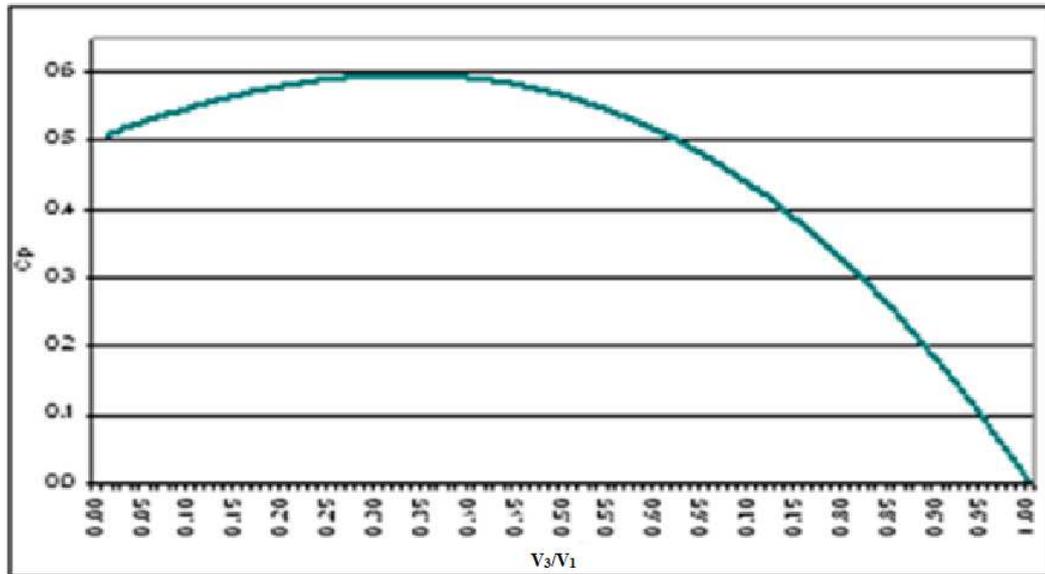
Portanto:

$$C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (24)$$

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

$$C_{pBetz} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad \text{Quando} \quad \frac{v_3}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (25)$$

Figura 31 - Distribuição de c_p em função de v_3/v_1



Fonte: Silva (2014).

Há várias vantagens em operar turbinas eólicas em velocidade variável. A mais óbvia é o crescimento na eficiência aerodinâmica. Isso pode ser observado claramente se o coeficiente de potência, C_p , do rotor, for traçado em função da razão entre a velocidade da ponta das pás e a do vento (tip speed ratio – TSR), (JUNIOR, 2006).

O Tip-Speed Ratio (λ), ou TSR de uma turbina eólica é a razão entre a velocidade rotacional da ponta da pá do rotor e a velocidade do vento real (U). O TSR está relacionado com a eficiência, com seu valor ótimo variando com o projeto da turbina. Quanto maior o TSR , maior o nível de ruídos e mais forte precisam ser as pás do rotor devido a altas forças centrífugas.

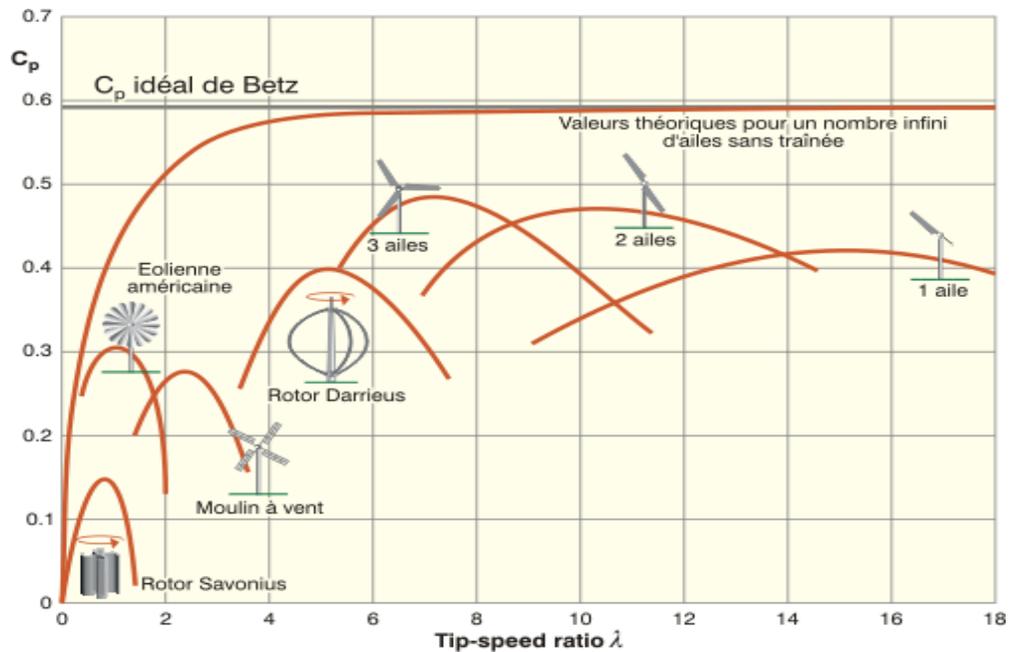
$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (26)$$

Onde:

- λ = Tip-Speed Ratio
- U = Velocidade do Vento [m/s]
- R = Raio do Rotor [m]
- ω = Velocidade Rotacional do Rotor [rad/s]

A figura 32 mostra a distribuição do coeficiente de potência (c_p) em função do TSR (λ) para diversos tipos de rotores.

Figura 32 - Distribuição de c_p em função de λ para diversos tipos de rotores



Fonte: Silva (2014).

A solidez do rotor (σ) é definida como a razão entre a área total das pás e a área varrida pelas pás. Então, quanto maior for a área das pás, ou menor for a área varrida pelas pás, maior será a solidez do rotor.

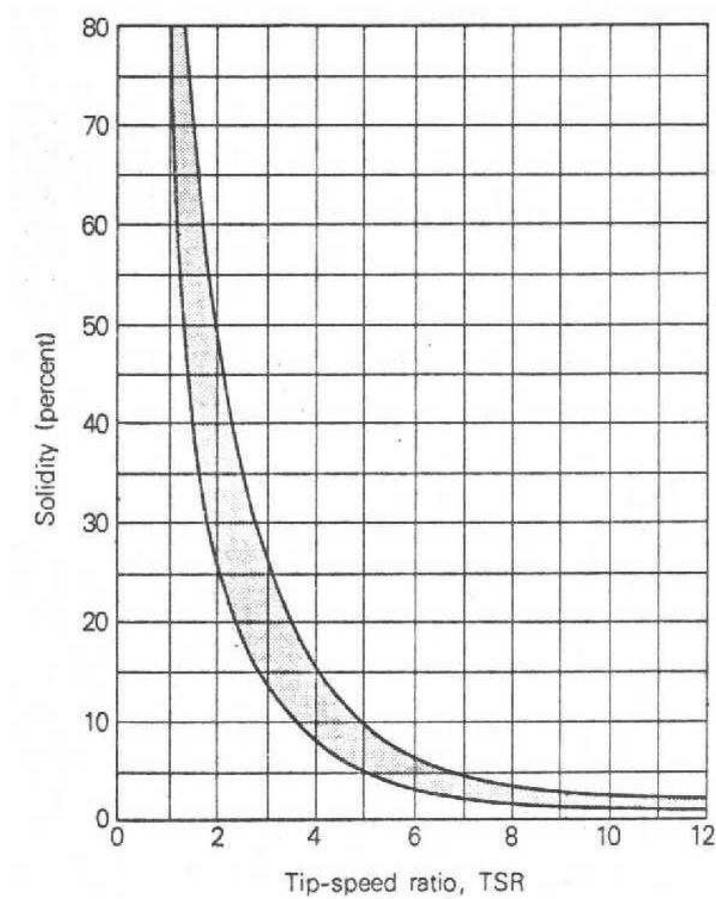
$$\sigma = \frac{nA_p}{\pi R^2} \quad (27)$$

Onde:

- σ = Solidez do rotor
- n = Número de pás
- A_p = Área da superfície da pá
- R = Raio do rotor

A solidez e o TSR estão relacionados através do gráfico a seguir:

Figura 33 - Gráfico de relação Solidez/TSR



Fonte: Silva (2014).

A solidez calculada para este projeto é:

$$\sigma = 22\% \quad (28)$$

Portanto, a partir do gráfico da Figura 13 temos que:

$$\lambda = 5 \quad (29)$$

E de acordo com a figura 32:

$$C_p = 0,4 \quad (30)$$

Aplicando os dados abaixo na equação 26:

$$R = 0,2 \text{ m} \quad (31)$$

$$U = 12 \text{ m/s} \quad (32)$$

Temos que:

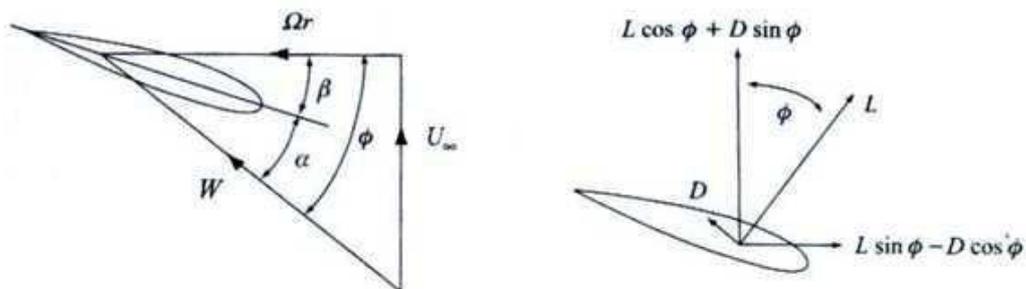
$$\omega = 300 \text{ rad/s} = 2864,8 \text{ rpm} \quad (33)$$

Outros dados importantes para o nosso projeto de acordo com o perfil escolhido para nossa pá. A figura 34 ilustra as velocidades e as forças atuando sobre uma seção de uma pá do rotor.

Onde:

- ϕ = Ângulo de escoamento [°]
- α = Ângulo de ataque [°]
- β = Ângulo de passo [°]
- W = Velocidade relativa do vento [m/s]
- U = Velocidade do vento [m/s]
- ωr = Velocidade rotacional [m/s]
- L = Força de sustentação [N]
- D = Força de arrasto [N]

Figura 34 - Velocidades e forças atuando sobre uma seção da pá de um rotor



A velocidade relativa resultante na pá é:

$$W = \sqrt{U^2 + (\omega R)^2} \quad (34)$$

Portanto:

$$W = 61,2 \text{ m/s} \quad (35)$$

O ângulo de escoamento ϕ é definido como:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{U}{\omega R} \right) \quad (36)$$

Logo:

$$\phi = 0,46^\circ \quad (37)$$

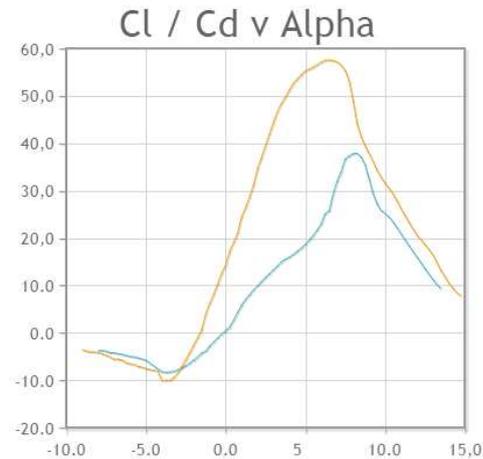
Para este projeto usamos o perfil aerodinâmico GOTTINGEN 602 o mesmo usado nos projetos de asas das aeronaves, pois o princípio utilizado é o mesmo.

$$Re = 100.000 \quad (38)$$

$$\frac{C_l}{C_d} = 57,6 \quad (39)$$

$$\alpha = 6,5^\circ \quad (40)$$

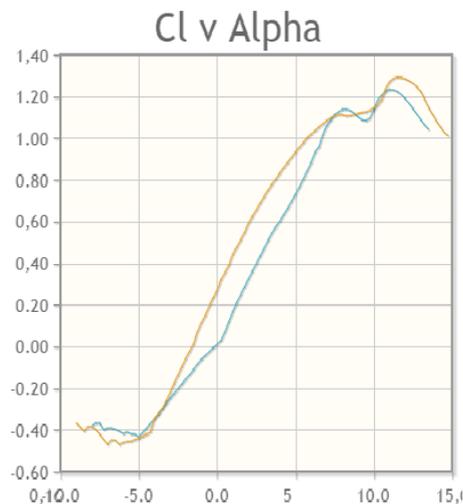
Figura 35 - Gráfico do coeficiente de sustentação e arrasto



Fonte: Autor (2016), usando AIRFOLL.

A figura acima temos o coeficiente de sustentação em função do coeficiente de arrasto, onde linha amarela para Reynolds 100.000 e linha azul para Reynolds 50.000, utilizamos o Reynolds 100.000, pois é onde obtemos a maior relação c_l/c_d e o menor ângulo de ataque.

Figura 36 - Gráfico coeficiente de sustentação por alpha



Fonte: Autor (2016), usando AIRFOLL.

A figura acima temos coeficiente de sustentação para alpha igual a 6,5, analisando o gráfico temos c_l mais ou menos igual a 1, batendo perfeitamente com os cálculos feitos para esse projeto.

$$v = 1,5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s} \quad (41)$$

$$Re = 100.000 \quad (42)$$

$$U = 12 \frac{m}{s} \quad (43)$$

Logo:

$$c = 0,12 \text{ m} \quad (44)$$

Vamos considerar que perfil aerodinâmico da pá é constante ao longo do raio do rotor, utilizando a teoria de glauert que o torque geral por um rotor é:

$$T = \frac{1}{4} \rho W^2 n_p c (Cl \sin\phi - Cd \cos\phi) (R^2 - R_b^2) \quad (45)$$

Podemos mostra também que a força axial exercida sobre o rotor é:

$$Fx = \frac{1}{2} \rho W^2 n_p c (Cl \cos\phi - Cd \sin\phi) (R - R_b) \quad (46)$$

Onde:

- ρ = Massa específica do ar [Kg/m³]
- W = Velocidade relativa [m/s]
- n_p = Número de pás do rotor
- c = corda da pá do rotor [m]
- C_l = Coeficiente de sustentação
- C_d = Coeficiente de arrasto
- R = Raio do rotor [m]
- R_b = Raio do Bosso [m]

Com:

$$\rho = 1,225 \frac{kg}{m^3} \quad (47)$$

$$R_b = 0,125 \quad (48)$$

CAPÍTULO V

5. CONFIGURAÇÃO ELÉTRICA

5.1. Geradores

Nas turbinas eólicas, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica de rotação por meio do eixo da turbina. Esta rotação da turbina é relativamente baixa e, dependendo do tipo de gerador, pode ou não ser adaptada à velocidade nominal do gerador que, por sua vez, depende do número de polos e da frequência da rede. (GONZALEZ, 2012, p. 34).

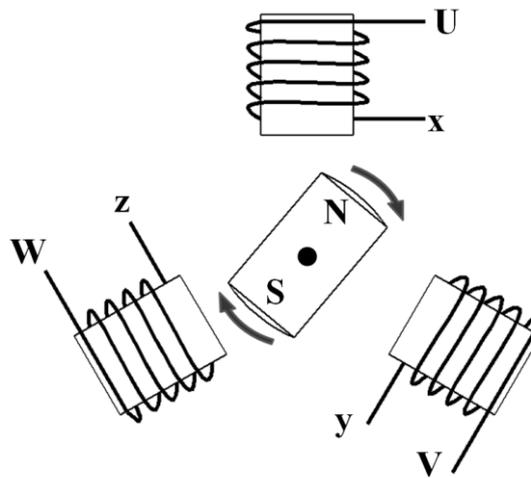
Sendo a velocidade uma consequência do equilíbrio entre o torque eletromagnético e o torque desenvolvido pelo vento, esta pode experimentar constantemente variações. Estas variações de velocidade podem ser transmitidas como variações na potência entregue pelo aerogerador para a rede elétrica. (TARNOWSKI, 2006 apud GONZALEZ, 2012).

Para elucidar algumas características e classificação de geradores serão feitas algumas observações sobre tais variações. A princípio destacaremos a principal diferença entre o gerador síncrono e assíncrono.

Os geradores síncronos giram com uma velocidade de rotação igual à velocidade do campo girante (velocidade de sincronismo) e os assíncronos rodam com uma velocidade superior à velocidade de sincronismo, existindo escorregamento do rotor em relação ao campo girante.

A característica principal dos geradores síncronos é a transformação de energia mecânica em energia elétrica tendo uma conexão constante entre a sua velocidade angular e a frequência de suas correntes geradas.

Figura 37 - Máquina Síncrona



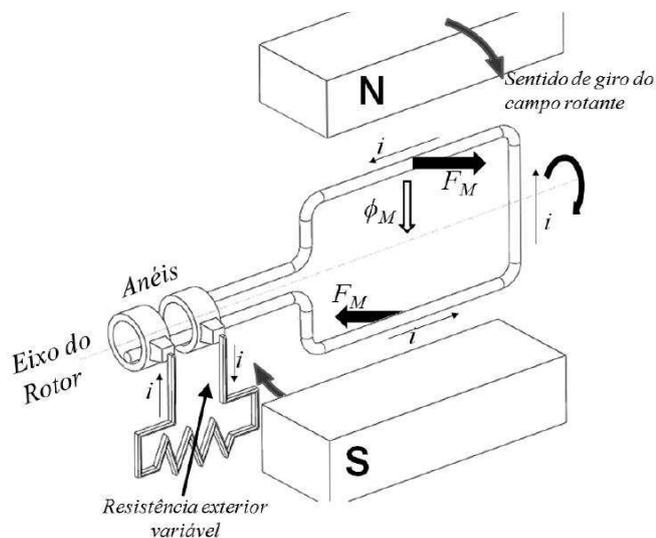
Fonte: Gonzalez (2012).

Este tipo de equipamento pode ser utilizado tanto em pequenas turbinas como nas de médio e grande porte. Usam conversor de frequência permitindo que trabalhe com velocidade variável, tendo o controle de potência, além disso, estes não são conectados diretamente a rede, pois possuem frequência constante. (PIRES, 2010)

Máquinas síncronas tendem a ser utilizadas para carregar baterias.

Os geradores assíncronos fazem parte dos equipamentos conectados à rede elétrica. Aerogeradores de grande porte, quando fazem parte de fazendas eólicas com intuito de gerar energia na faixa de MW, se utilizam de máquinas assíncronas. (PIRES, 2010, p 42)

Figura 38 - Rotor de uma máquina assíncrona com anéis



Fonte: Gonzalez (2012).

Turbinas eólicas de pequeno porte, com intuito de geração de pequena corrente podem ser feitas com alternadores, síncronos que gerem, deste modo, corrente alternada para que possam carregar conjunto de baterias e fornecer energia elétrica onde estejam instalados. Conforme a potência de rotação do eixo do gerador aumenta, aumenta-se também a corrente elétrica gerada, logo dizemos que estas grandezas são diretamente proporcionais.

A classificação dos geradores assim como exemplos de cada tipo de topologia normalmente utilizados na indústria eólica. Suas principais particularidades são relatadas bem como as suas vantagens e desvantagens.

5.2. Máquinas de corrente contínua

A máquina CC é usada para se dispensar o uso de retificadores CA-CC, por esta conversão ser feita internamente por comutadores mecânicos. Este tipo de máquina possui baixo rendimento e requer muita manutenção e, em razão disso, foi usada somente em sistemas de baixa potência até os anos 1980, pela facilidade de controle (TIBOLA, 2009, p 20).

5.3. Topologia de Aero geradores

Há alguns aspectos que devem ser levados em consideração quando se decide empregar deste tipo de energia, pois existem várias tecnologias já sendo utilizadas, alguns desses aspectos podem ser descritos como: o potencial eólico a explorar, retorno financeiro almejado do investimento além da satisfação das características operacionais pretendem ser alcançadas.

5.3.1. Máquinas síncronas convencionais

Este tipo de máquina já esta muito bem consolidada sendo a mais usada em todo o mundo. Todas as suas particularidades conferidas assim velocidade fixa, onde conserva uma frequência também fixa, podendo ser usada em parques eólicos que funcionem a velocidade fixa. Sua grande desvantagem esta no fato de esta necessitar de corrente de corrente contínua para excitar o campo magnético do rotor (TIBOLA, 2009).

5.3.1.1. Gerador Síncrono conectado a rede via conversor de potência com excitação e sem caixa de transmissão.

Gerador síncrono com alto número de polos, assim este trabalha com a velocidade angular da turbina, não necessitando de multiplicador de velocidade.

Segundo Gonzalez (2012, p.37) [...] A conexão a rede elétrica realiza-se por meio de um conversor de potência o qual deve suportar o 100% da potência nominal. [...] O conversor de potência pode ser unidirecional ou bidirecional permitindo desacoplar a velocidade angular do gerador da frequência da rede.

As vantagens são similares as dos geradores de indução duplamente alimentados com a adição da característica de não precisar caixa multiplicadora, facilitando a manutenção e reduzindo os custos da mesma.

Um das suas principais desvantagens seriam a obrigatoriedade em fabricar geradores síncronos, gerando elevado custo inicial, causado pelo conversor eletrônico para potência nominal, utilização de anéis deslizantes para gerar a excitação do rotor, aumentando assim o custo com a manutenção. Além de ter-se limitação de potência mecânica conseguido, nestes casos, por meio da variação de ângulo de passo das pás (GONZALEZ, 2012).

5.3.1.2. Gerador síncrono conectado a rede via conversor.

Conforme GONZALEZ (2012) Esta máquina trabalha de forma análoga à citada anteriormente sendo sua principal diferença quantidade menor de polos, fazendo assim a necessidade do uso de caixa de transmissão para aumentar a velocidade do rotor até a velocidade angular nominal do gerador. Esta tensão produzida é retificada e com o uso do inversor a frequência de tensão de saída é sincronizada à frequência da rede.

5.3.1.3. Gerador síncrono conectado diretamente a rede.

Conferindo as colocações de CUSTODIO, 2009, apud Gonzalez, 2012 esta é uma turbina de velocidade fixa com ajuste da frequência gerada da rede. Como não há como impedir as pequenas variações na rotação da turbina, a frequência gerada também sofre alterações (como já dito anteriormente), com isso o uso deste equipamento torna-se restrito ao uso em paralelo de redes elétricas robustas.

5.3.1.4. Gerador Síncrono com transmissão hidrostática.

Esse tipo de máquina ainda inovadora tem seu desenvolvimento obtido há pouco tempo. Baseado em uma regulação de potência variando a relação transmissão rotor-gerador. Para Gonzalez (2012, p. 72) “Esta relação é obtida a partir da diferença entre o deslocamento volumétrico de uma bomba hidráulica acoplada ao rotor e de um motor de deslocamento variável acoplado ao eixo do gerador”. Esse aspecto dar-se ao fato de o gerador elétrico poder trabalhar a uma velocidade angular fixa isso por que as mudanças na velocidade do rotor são equilibradas por uma alteração do deslocamento variável do motor hidráulico.

5.3.2. Máquina de indução

Já bem utilizada nas indústrias por todo o mundo pode-se concluir que este tipo de metodologia de máquina geradora está bem consolidada. Sendo assim pode-se citar várias vantagens em sua aplicação:

- Possibilidade de ser construída sem o uso de escovas e de não precisar de campo de excitação CC.
- Máquina de baixo custo necessita de pouca manutenção e pode possuir alto desempenho; por essas razões, são usadas comumente em grandes e pequenos sítios eólicos e em plantas hidroelétricas de pequena potência.

A máquina de indução necessita uma corrente de excitação CA, podendo ser autoexcitada ou excitada externamente. Quando ligada à rede, a excitação é feita pela própria linha. O gerador, neste caso, precisa ser capaz de suprir potência reativa (TIBOLA, 2009, p. 20).

5.3.2.1. Gerador de indução conectado diretamente a rede.

Por sua definição, este tipo de sistema utiliza um gerador assíncrono, com rotor em gaiola e estator diretamente ligado a rede. A transmissão é responsável por amplificar a velocidade angular nominal do gerador. Considerado aerogerador de velocidade fixa, pois há pouca variação de velocidade angular devido à frequência da rede e tensão do estator.

Segundo Burton et al. 2001 apud Gonzalez 2012, p.35, este tipo de aerogerador é aplicado em turbinas desde 100 kW até os 1,5 MW, tendo como principal vantagem a simplicidade e robustez do sistema, o que resulta num menor custo inicial.

Nas desvantagens podemos citar o consumo elevado da potência reativa da rede e o baixo coeficiente aerodinâmico e para compensar a sua limitação da potência usa-se o controle tipo stall.

Com isto, as perturbações nas condições do vento vêm-se refletidas na qualidade da potência gerada.

É comum este tipo de gerador contar com duas velocidades angulares fixas as quais se conseguem utilizando dois geradores com diferentes números de polos e comutando a operação entre eles para ficar mais perto do funcionamento ótimo da turbina (CABALLERO, 2000).

5.3.2.2. Gerador de indução com controle de escorregamento

Esta estrutura situa-se na categoria de velocidade variável numa faixa de até 10% da velocidade de sincronismo (ACKERMANN, 2005).

O sistema possui o rotor bobinado com a capacidade de variar a resistência do rotor que, desta maneira, compensa as variações do escorregamento.

Segundo Gonzalez (2012, p 35) “Para controlar a variação da resistência do rotor utilizam-se anéis deslizantes, o que representa um ponto de manutenção importante. Uma opção de transmissão de sinais de controle via comunicação ótica e utilizada, [...] Esta classe de gerador precisa de compensação de potência reativa”.

5.3.2.3. Gerador de Indução conectado a rede via conversor.

Este tipo de sistema de gerador de velocidade variável que consiste em um desacoplamento do conversor de frequência da velocidade angular do gerador de frequência da rede. Nesse sistema é preciso fornecer energia reativa, feito por autoexcitação usando-se um banco de capacitores instalado antes do retificador, para excitação do gerador.

“Os capacitores devem ser conectados antes do retificador, uma vez que a conversora de frequência faz isolamento galvânico entre o gerador e o sistema, não permitindo a absorção de energia reativa externa, seja do sistema elétrico ou de capacitores” (CUSTODIO, 2009, apud Gonzalez, 2012, p 36).

5.3.2.4. Gerador de Indução duplamente alimentado (DFIG)

O princípio maquinal deste gerador está diretamente relacionado ao do gerador de indução conectado diretamente a rede, o que os diferencia é que ao invés de um rotor em gaiola, utiliza um gerador assíncrono de dupla alimentação.

Neste tipo de gerador, o estator é conectado diretamente a rede e a potência gerada no rotor é injetada na rede por meio de um conversor de potência bidirecional PWM-IGBT back-to-back (TARNOWSKI, 2006).

Com a disponibilidade de se variar a velocidade de rotação da turbina pode-se chegar ao melhor funcionamento desta, ou seja, encontrar os pontos que garantam melhor rendimento e funcionamento para qualquer tipo de condições do vento. As variações de potências são amenizadas pela variação na velocidade de rotação da turbina. E o limite de potência mecânica admite-se pelo controle de ângulo de passo das turbinas (Gonzalez, 2012).

Segundo Tarnowski (2006), a principal desvantagem e a complexidade do sistema de controle é a necessidade da utilização do multiplicador de velocidade, o que faz encarecer o projeto de instalação e manutenção. Estas características fazem com que esta concepção seja viável para turbinas com potências acima de 1 MW.

5.3.3. Máquina síncrona a ímã permanente

A penúria por trabalhar com velocidade variável resultou na maior procura por máquinas síncronas, porém encontrou-se maior dificuldade em relação ao problema de campo, já mencionado, pensando nisso uma solução para esta complicação foi o uso de ímãs permanentes, conhecidas como PMSM (Permanent Magnet Synchronous Machine). Este dispositivo tem aspectos análogos aos do Gerador Síncrono conectado a rede via conversor de potência com excitação e sem caixa de transmissão,

Para Gonzalez (2012); Fitzgerald *et al.* (2006), apud Linard (2014); MAIA (2011). As máquinas síncronas que dispõem da utilização de ímãs permanentes tornam a tecnologia mais simples, pois, não possuem enrolamentos das bobinas de campo, fazendo com que o campo magnético seja alcançado pela densidade de fluxo magnético constante, tornando-o assim um gerador com um volume menor.

Além de que segundo TIBOLA (2009) “A aplicação de velocidade variável nos PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) faz com que hajam alguns benefícios,

sendo estes logo citados: permite acrescentar a energia capturada do vento, soluciona problemas de ruído e melhora a eficiência.

Tais ímãs são fixados, em alguns casos, tangencialmente na superfície do rotor, ou embutidos no mesmo (FITZGERALD *et al.*, 2006 apud LINARD, 2014, p. 34).

O funcionamento, os tipos, equacionamento e demais detalhes dessa máquina serão apresentados no decorrer deste trabalho.

5.3.3.1. Gerador Síncrono a Imã Permanente

Este equipamento segue a configuração citada em capítulos anteriores sendo que agora como gerador este converte energia mecânica em energia elétrica

Os geradores com o sistema de excitação baseado em ímãs permanentes são uma alternativa promissora para os sistemas de conversão de energia eólica, quer em médias e elevadas potências, quer em sistemas de baixas potências. (FERREIRA, 2011, p. 10).

Na verdade, uma classificação bem específica dessa máquina será o motivo de estudo e, por fim, dimensionada neste trabalho, tendo como aplicação geração de energia eólica provida do acoplamento em veículo automotor.

Para confirmar o objeto de estudo deste trabalho é importante dar atenção a afirmação de Linard (2014, p. 32) “As máquinas síncronas de ímãs permanentes podem ser classificadas em duas topologias: máquina síncrona de fluxo magnético radial e máquina síncrona de fluxo magnético axial. Estas máquinas podem ser usadas para geração de energia elétrica através de turbinas eólicas”.

Algumas características e vantagens das máquinas de ímãs permanentes quando aplicadas em energia eólica segundo NUNES JUNIOR (2008, p.129):

- Não necessita da caixa de transmissão mecânica reduzindo assim manutenção mecânica;
- Podem operar em baixa rotação, devido à quantidade de polos magnéticos;
- Sua estrutura permite melhor aproveitamento da potência extraída do vento;
- Facilidade de controle do sistema como, por exemplo, controle do fator de potência;
- Redução do ruído gerado, propiciando instalações em regiões habitadas;
- Eliminação de anéis e escovas de contato, reduzindo assim a manutenção;
- Redução das perdas no enrolamento do núcleo do rotor;

- Com a redução das perdas, se obtém maior rendimento, reduzindo-se o seu tamanho.

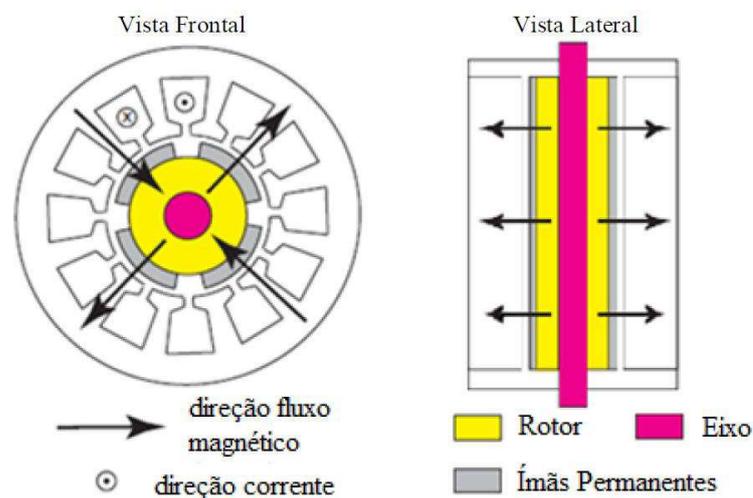
A seguir serão demonstradas e discutidas as características e diferenças em relação à classificação das máquinas a ímã permanente com relação à orientação de fluxo dentro da estrutura, já mencionadas anteriormente.

a) Gerador Síncrono a Imã Permanente de Fluxo Radial

Nessa configuração, o fluxo magnético percorre uma direção perpendicular ao sentido de rotação do rotor, o que por sua vez pode ser construtivamente adotado em topologia de rotor interno ou externo (MAIA, 2011, p. 7).

Superam as máquinas de indução em sua capacidade e em eficiência devido a características de construtivas, mas a sua desvantagem está relacionada à manutenção dos ímãs permanentes, além de sua limitação de potência, pois, a partir de um determinado intervalo de potência tornam-se inviáveis a fabricação de ímãs tão robustos (LINARD, 2014).

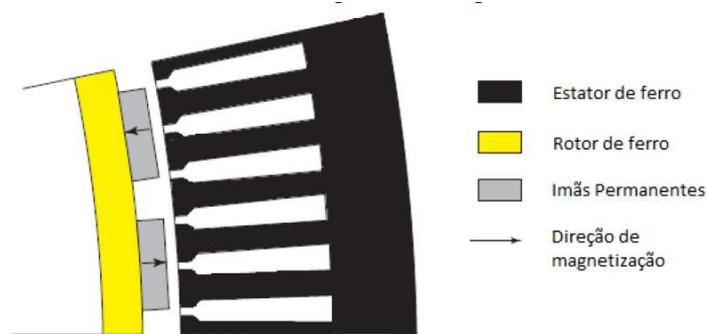
Figura 39 - Desenho representativo de uma máquina a ímãs permanentes de fluxo Radial



Fonte: Adaptado de MAIA, 2011

Falando da concepção de máquina, mais utilizada, com rotor interno podemos perceber a disposição e plano do qual esses ímãs se encontram observando a figura 39. Podendo-se tirar por conclusão a prerrogativa de LINARD (2014, p. 34). “Uma vantagem desta máquina é que sua construção é mais simples e, conseqüentemente, possui um custo menor do que outras máquinas de ímã permanente”.

Figura 40 - Secção transversal da máquina de ímã permanente com rotor interno

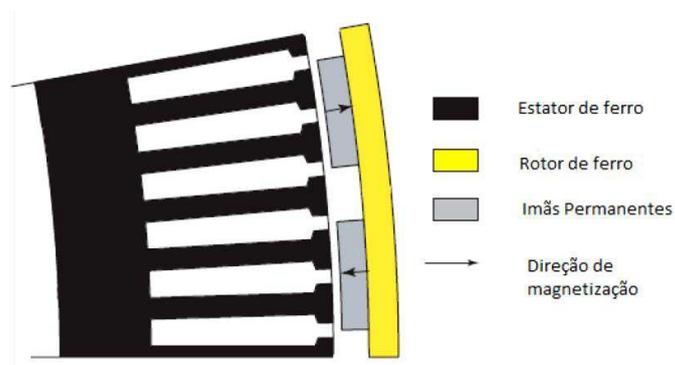


Fonte: LIBERT, 2004, apud LINARD, 2014.

E ainda cita mais. “A principal desvantagem desta máquina é a exposição dos ímãs permanentes aos campos desmagnetizantes, que são definidos como a diferença entre o campo magnético existente no interior do material e o campo externo aplicado. Esses geradores foram usados nas primeiras turbinas eólicas com acionamento direto” (LIBERT, 2004 apud LINARD, 2014, p. 34).

Já a topologia com o rotor externo segundo Ferreira (2011, p. 16), “favorece o espaço disponível para acomodar a estrutura multipolar, mas em contrapartida o comportamento térmico da máquina é prejudicado, sendo necessário recorrer a sistemas de arrefecimento forçado para extrair o calor originário nas perdas no estator interno”. Podendo ser observado na figura 41.

Figura 41 - Secção transversal da máquina de ímã permanente com rotor externo



Fonte: LIBERT, 2004, apud LINARD, 2014.

Essas variações de máquinas de fluxo radial podem ser usadas para aplicação na energia eólica. E como já mencionado há ainda as máquinas de fluxo axial que serão apresentadas a seguir.

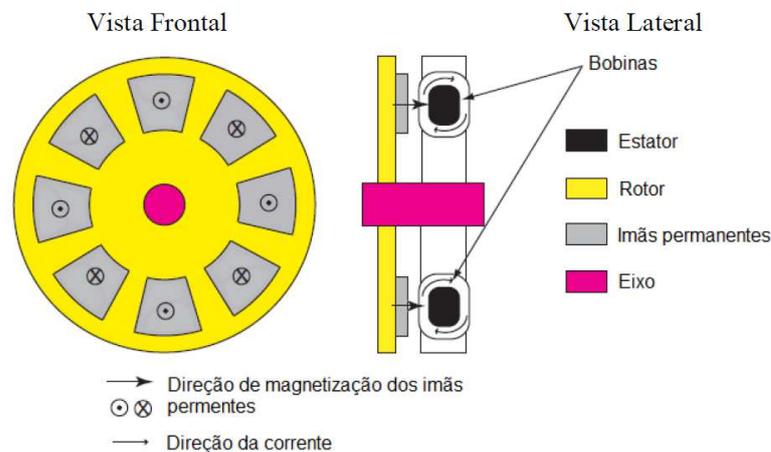
b) Gerador Síncrono a Imã Permanente de Fluxo Axial

Embora até os dias de hoje essa topologia tem aspecto inovador foi inventada antes da máquina de fluxo axial, assim datada por M. Faraday (Gieras et al., 2008). Mesmo com essa descoberta esta configuração não engrenou e só começou a ser utilizada mais de cem anos depois, devido à falta de tecnologia para sua confecção, especialmente os materiais magnéticos que eram pouco desenvolvidos, resultando em potências muito baixas consideradas inúteis (TIBOLA, 2009).

Segundo Maia (2011) e Tibola (2009) Neste tipo e configuração de máquina a ímãs permanentes uma característica bem marcante é a forma de disco em que são feitos o estator e rotor. Assim com este tipo de formato é possível que esta máquina tenha várias variações ou *designs*.

Para Linard (2014, p. 35) Estas máquinas possuem um maior diâmetro e um menor comprimento do que as máquinas de fluxo magnético radial. O fluxo dos ímãs permanentes é axial e a corrente flui radialmente. A máquina de fluxo magnético axial é mostrada na figura 42.

Figura 42 - Máquina de fluxo magnético axial com ímãs permanentes, mostrando fluxo dos ímãs permanentes e direção da corrente



Fonte: LIBERT, 2004, apud LINARD, 2014.

Além de esta particularidade, distintamente das máquinas de fluxo axial, resultarem em, para Tibola, (2009, p. 54) “[...] podem acomodar um grande número de polos, podendo, assim, operar em baixas rotações”.

Outra particularidade seria “O comprimento radial do raio interno ao raio externo é a parte ativa que produz torque. O comprimento axial é dependente da densidade do fluxo mutuo entre o estator e rotor” (NUNES JUNIOR, 2008, p.129).

Conforme dito por Maia (2011) esta máquina com fluxo axial, recebe este nome pois a direção do fluxo magnético é colateral ao sentido de rotação do rotor, é pouco difundida o que resulta em escassa comercialização deste tipo de aparelho a imã permanente.

Comparando as maquinas elétricas convencionais com as maquinas de fluxo axial apresentam uma relação potência/peso muito mais alta que as maquinas convencionais para os mesmos rendimentos. Essa razão alta se consegue através de um numero elevado de polos. Para realizar esta comparação e justificar o emprego das máquinas de fluxo axial comparando-se a sua densidade de potência com as maquinas de fluxo radial pode-se utilizar a equação 49, (SILVA; ROCHA; MARCOLINO, 2006; COSTA, 2007 apud NUNES JUNIOR, 2008, p. 128)

$$\xi_M = \frac{P_M}{V_M} \quad (49)$$

Onde ξ_M é a densidade de potência, P_M é a potência e V_M é o volume.

Para as máquinas de potências médias e pequenas, a razão que compara as densidades de potência para ambos os tipos de máquinas de características similares (um rotor e um estator) vem estabelecida pela equação 50.

$$\xi_M = \frac{\xi_{MA}}{\xi_{MR}} = \frac{p(1 + \pi/4p)^2}{\pi} \quad (50)$$

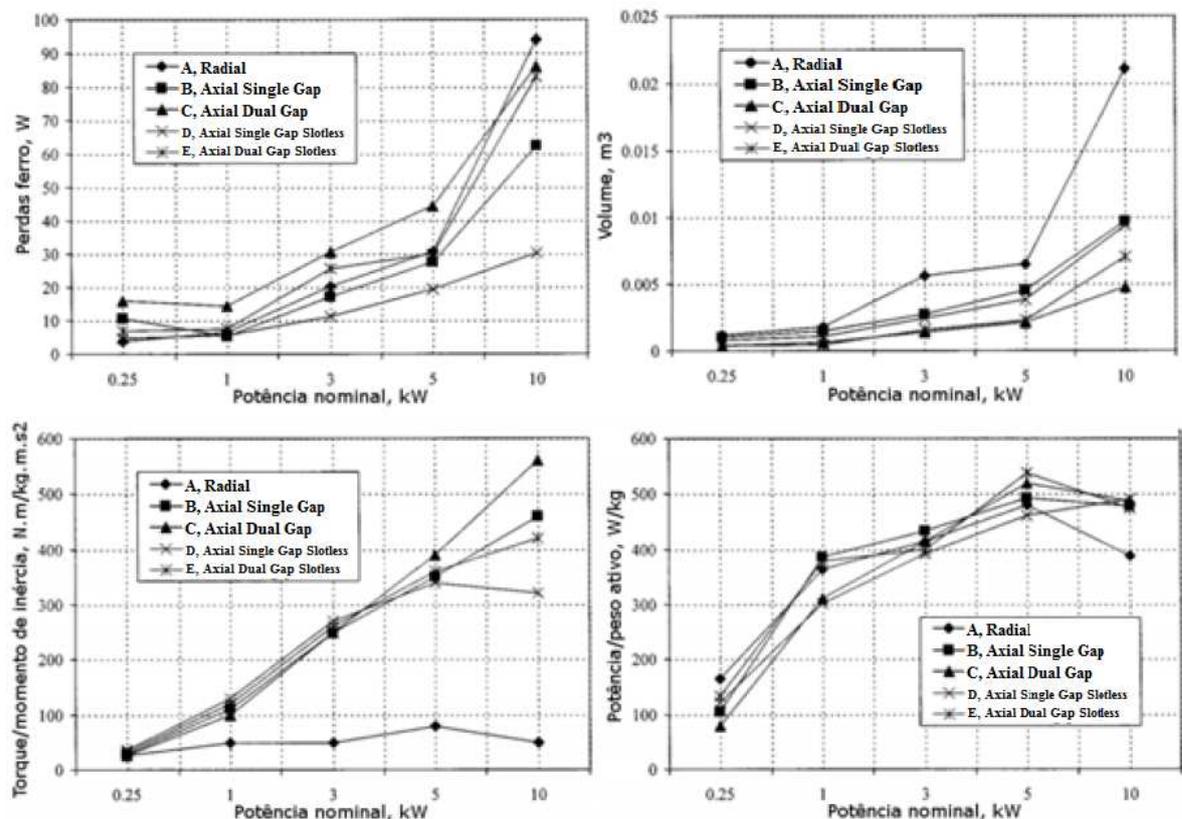
Onde ξ_M é a relação das densidades de potência, ξ_A é a densidade de potência das máquinas de fluxo axial W/m^3 , ξ_{MR} é a densidade de potência das máquinas de fluxo radial e p é o número de pares de polos.

“A equação 50 demonstra que a relação das densidades de potência é uma função do número de pares de polos p , e assim se deduz que para as máquinas multipolares a

densidade de potência é muito maior, como nas máquinas de fluxo axiais” (NUNES JUNIOR, 2008, p. 129).

È importante ressaltar a significante vantagem das máquinas de fluxo axial sejam elas: densidade de potência e reduzido volume efetivo, o que defende assim a sua utilização em sistemas eólicos, e também a expressiva redução na parcela de perdas do núcleo ferromagnético fazendo com que estas máquinas tenham um maior valor de eficiência (MAIA, 2011).

Figura 43 - Comparativo entre máquinas de fluxo axial e fluxo radial



Fonte: Adaptado de Sitapati and Krishnan (2001) apud Maia (2011).

A variação do sentido do fluxo magnético pode ocasionar diferenças entre tamanho, potência e eficiência, levando em consideração máquinas de potências equivalentes e fluxo diferente. As máquinas de orientação axial superam as de fluxo radial no que diz respeito à relação potência e volume efetivo total

[...] “A medida que a potência gerada pela máquina de fluxo axial aumenta, a superfície de contato entre o rotor e o eixo ficam menores em termos proporcionais. Dessa forma se torna mais complicado projetar estruturalmente essa junção”... (MAIA, 2011, p. 9).

5.4. Ímãs permanentes

Os ímãs permanentes são objetos que foram fabricados a partir de um material magnetizado e são assim capazes de criar seus próprios campos magnéticos persistentes. De modo geral, os ímãs podem ser divididos em duas categorias: não permanentes e permanentes. Os ímãs não permanentes são eletroímãs, que precisam que haja a passagem de uma corrente elétrica para que exista ativação do magnetismo.

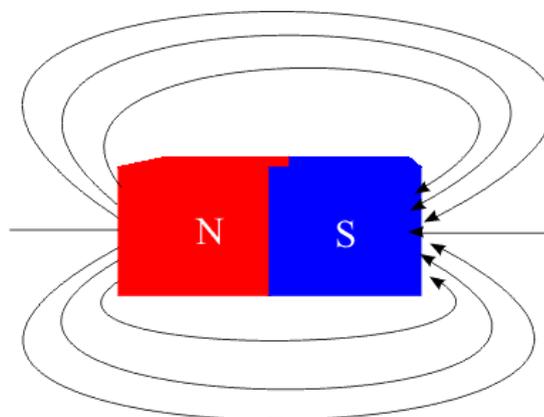
Os ímãs permanentes tendem a manter o seu magnetismo permanentemente a não ser que sejam afetados por fatores externos como vibrações, sujeira, corrosão ou interferência de campos magnéticos fazendo com que sejam desmagnetizados.

A capacidade de um ímã para a retenção de seu magnetismo sob várias condições é chamada de “permanência magnética”, e alguns tipos de ímãs permanentes têm uma maior capacidade de permanência do que outros (SILVA, 2012).

Normalmente, os ímãs permanentes são fabricados com base em elementos químicos, tais como elementos de terra rara como o alnico (alumínio, níquel, cobalto), cerâmica (tais como estrôncio e ferrite de bário), e ligas de elementos raros, incluindo Sm-Co (cobalto-samário) e NdFeB (neodímio-ferro-boro).

Bem como uma opção proveitosa entre todos os tipos de ímãs industriais, os ímãs permanentes são largamente empregados em muitas indústrias, especialmente para aplicações que requerem força magnética constante, como na separação do metal e exploração, bem como a fabricação automotiva, industrial, aeroespacial, construção e muito mais (SILVA, 2012).

Figura 44 - Fluxo magnético em ímã permanente



Fonte: Silva (2012).

5.4.1. Classificação dos Ímãs Permanentes

Para efeito de classificação, os ímãs permanentes podem ser agrupados em três grandes famílias:

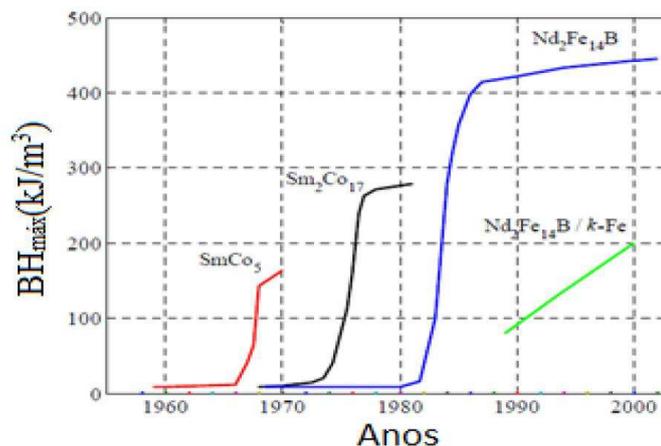
- Alnicos (Al, Ni, Co, Fe);
- Cerâmicos (*Ferrites*): *ferrites* de bário e *ferrites* de estrôncio; e
- Terras-raras (SmCo e NdFeB).

No entanto só a partir da década de 90 passaram a existir algumas ações com a finalidade da utilização de máquinas síncronas excitadas por ímãs permanentes (HUANG *et al.*, 2001 apud LINARD, 2014).

Um dos fatores que justificam o sucesso das máquinas de ímãs permanentes é a eficiência dos ímãs permanentes das terras raras, a facilidade em encontra-los e a custos acessíveis. Este tipo de aplicação possibilita alguns arranjos e configurações não encontrados em outros tipos mais comuns de geração de energia elétrica por meio de densidades de correntes, potenciando ainda o rendimento da máquina por eliminação das perdas de excitação.

Os ímãs permanentes mais comumente usados em geradores elétricos são os conhecidos neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B). A figura 45 apresenta uma evolução dos ímãs permanentes ao longo da história e mostra sua curva BxH.

Figura 45 - Evolução dos ímãs permanentes ao longo da história



Fonte: Huang (2001) apud Linard (2014).

Algumas características evidenciam a utilização dos ímãs de NdFeb para este tipo de projeto. Este consegue produzir um alto nível de magnetização, mas apesar deste fator o

aumento de temperatura pode ser considerado o seu “ponto fraco”, com relação a esse aspecto, tendo em vista que este tipo de imãs não suportam temperaturas superiores a 150, como é evidenciado na tabela a seguir:

Tabela 3 - Propriedades dos imãs permanentes

Material	Br (T)	Hc (kA/m)	(BH)máx. kJ/m ³	Permeabilidade relativa	Temperatura Limite (°C)
Alnico	0,71 - 1,31	43,8 - 160	11,9 - 82	2,1 - 6,4	520
Ferrite	0,23-0,42	180 - 280	25 - 31,8	1,04 - 1,2	400
Sm-Co	0,83 - 1,18	480 - 800	128 - 240	1,03 - 1,05	250
NdFeB	1,2 - 1,3	350 - 1120	280 - 350	1,03 - 1,20	150

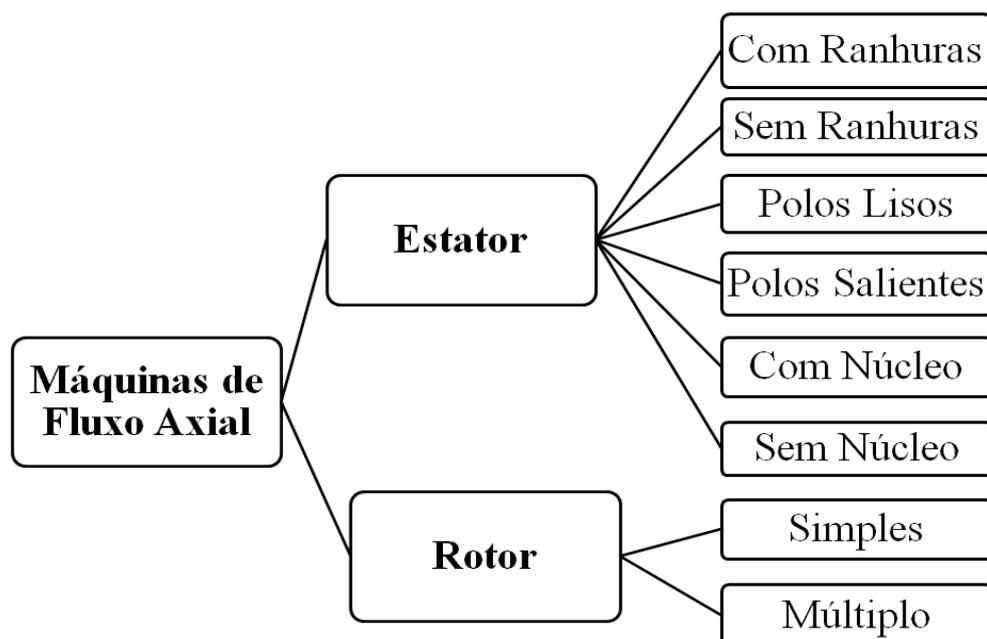
Fonte: Linard (2014).

Tomando-se ciência as características apresentadas e o seu potencial desempenho em geradores elétricos, o imã escolhido para este trabalho foi o Nd-Fe-B.

5.5. Topologia das Máquinas de Fluxo Axial.

As máquinas de fluxo axial podem apresentar vários tipos de topologia e formas construtivas.

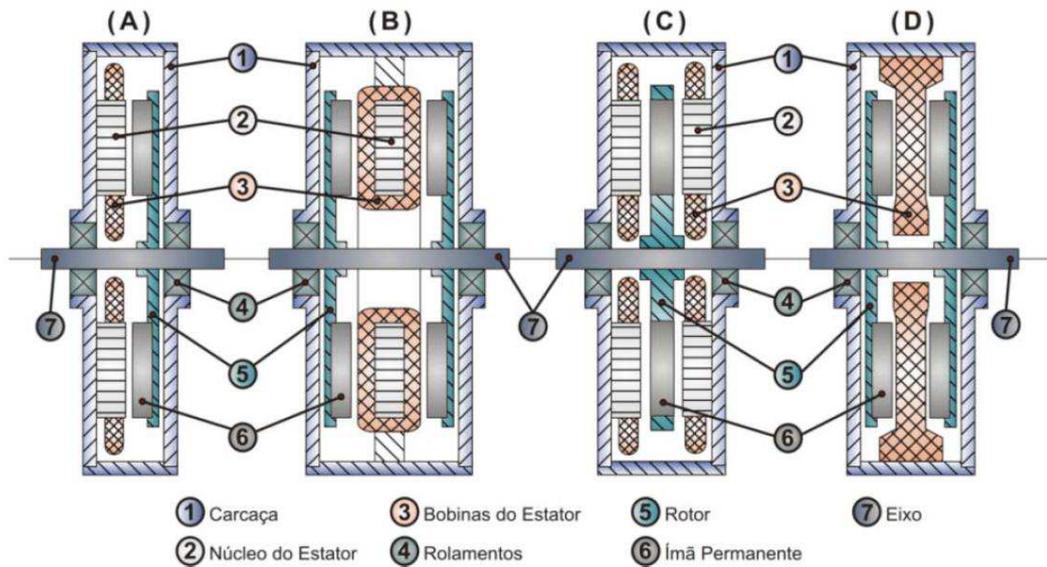
Figura 46 - Formas construtivas de Máquinas de Fluxo Axial



Fonte: adaptado Loureiro (2008).

Algumas combinações dos tipos de formas desta classificação apresentados anteriormente, serão mais bem evidenciados na figura 47 a seguir.

Figura 47 - Topologias de AFPMSG.

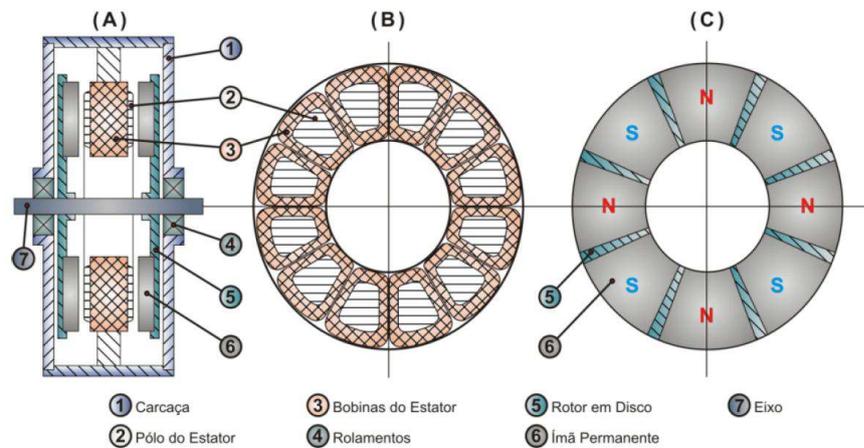


Fonte: Tibola (2009).

(A) Face única com ranhuras, (B) face dupla com estator interno sem ranhuras, (C) face dupla com estator externo, (D) face dupla com rotor interno.

Neste trabalho será usado a Máquina de fluxo Axial com estator ranhurado e rotor duplo, isto porque esta configuração foi conseguida através da adaptação de um motor de ventilador de teto. Na figura 48 podemos encontrar uma similar à adaptação feita neste trabalho, nesta figura encontram-se dois rotores um de cada face do estator, sendo estes, rotores a ímãs permanentes em forma de disco.

Figura 48 - Máquina de fluxo axial de polos salientes



Fonte: Tibola (2009).

(A) Estrutura construtiva, (B) vista frontal do estator bobinado, (C) vista frontal do disco de ímãs.

5.6. Retificadores

Os retificadores são circuitos elétricos que convertem a tensão CA (AC) em tensão CC (DC). Retificadores a diodo são encontrados em muitas aplicações, em geral como estágio de entrada de fontes de potência, acionamento de máquinas, carregadores de baterias e outros.

O que se adéqua a utilização em nosso experimento, pois na saída desse tipo de gerador encontramos a presença de tensão alternada, logo faremos uso desse artifício para termos resultados de tensão contínua.

Na maior parte das aplicações em eletrônica de potência, a entrada de energia tem a forma de uma tensão alternada senoidal em 60 Hz, proveniente da rede, que é convertida em tensão contínua para ser aplicada à carga.

Isto é realizado através dos conversores CA-CC, também chamado de Retificadores. Dependendo do semicondutor utilizado, tiristor ou diodo, os retificadores podem ser controlados ou não controlados respectivamente.

Neste caso a tensão de saída do retificador não pode ser controlada.

Em algumas aplicações, tais como acionamento de máquinas CC, alguns acionamentos de máquinas CA, controle de temperatura e sistemas de transmissão em corrente contínua, o controle da tensão de saída se faz necessário. Nestas situações são utilizados retificadores controlados.

Figura 49 - Retificador RS405L



Fonte: AliExpress Disponível em: <https://pt.aliexpress.com/price/rs405l-bridge-rectifier_price.html>

Este foi o tipo de retificador utilizado neste trabalho o RS405L, no qual suporta uma corrente de 4 Amperes e uma tensão de até 500 Volts.

5.7. Máquina de fluxo utilizada neste trabalho.

- Princípio de funcionamento

Os conceitos apresentados fundamentam o emprego das máquinas de imã permanente de fluxo axial na geração de energia elétrica eólica de pequeno porte. [...] A topologia axial foi adotada pela ENERSUD devido a ótima relação custo relativo e eficiência já comprovada em modelos de pequeno porte em operação. Argumentado por NUNES JUNIOR (2008, p. 133).

Como a sua forma de funcionamento se dá através da formação de campo indutor pelos imãs e não pelas bobinas de campo alimentadas por tensão contínua, ou seja, as linhas de fluxo produzidas pelos imãs é que induzem tensão nas bobinas. Desta forma a cada giro do rotor a forma de onda de fluxo passa pelas bobinas.

Como o projeto de gerador elétrico utilizado neste estudo surgiu por forma de adaptação de ventilador de teto, como já mencionado, fez-se necessária a coleta de alguns dados a partir de testes, entre outros que puderam ser calculados com base no desenvolvimento de diversas outras literaturas.

Assim segundo Tibola (2009, p. 59) “A tensão induzida resultante nos terminais de uma bobina é uma função do tempo, tendo a mesma forma de onda da distribuição espacial da indução magnética. A tensão da bobina passa por um ciclo completo de valores para cada rotação da máquina de p polos.”.

Os ímãs são alocados de forma a se manterem alternados na polaridade norte e sul, sendo assim, quanto maior o número de polos, maior será também a frequência para determinada rotação, isso por que a tensão em uma bobina terá passado por mais ciclos completos, ou seja, mais pares de polos terão passado por ela, em cada revolução do rotor.

Utilizando-se desta informação encontra-se o número de polos pela seguinte equação:

$$p = \frac{120f}{n} \quad (51)$$

$P = N^\circ$ de polos

$f =$ frequência do gerador [hz]

$n =$ velocidade nominal do rotor [rpm]

Para cada par de polos em uma máquina com n par de polos, ou um ciclo de distribuição de fluxo, vale 360 graus elétricos ou 2π radianos elétricos para isso faz-se necessário que se tenha $p/2$ comprimentos de onda ou ciclos em uma revolução completa.

Isso explica a expressão a seguir:

$$\theta_e = \frac{p}{2}\theta_m \quad (52)$$

Onde:

$\theta_e =$ Ângulo elétrico

$\theta_m =$ Ângulo mecânico

A frequência do gerador é baseada na tensão que passa pela bobina ou em cada par de polos que passam por ela na rotação, sendo assim a frequência (f_g) do gerador é encontrada pela expressão 53, e a frequência angular (ω_e) por 54.

$$f_g = \frac{p \omega_{rpm}}{2 \cdot 60} \quad (53)$$

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m \quad (54)$$

Para:

P = N° de polos;

ω_{rpm} = Velocidade em rotações por minuto [rpm];

ω_m = Velocidade mecânica em radianos por segundo [rad/s];

Um dos fatores fundamentais na máquina de fluxo axial utilizada neste trabalho seria a potência produzida no entreferro da mesma, pois segundo Ferreira, (2011, p.72) permite [...] identificar as principais variáveis do projeto e explicitar o princípio físico de funcionamento da máquina de IPFA.

Uma diferença marcante entre as máquinas de fluxo radial e axial seria a produção do campo eletromagnético onde esta é provinda em raio constante ou em raio variável, entre os raios interno e externo do núcleo do estator, respectivamente. Sendo assim algumas variáveis dependem da medida desses raios, ou seja, são funções dos raios ou simplesmente do diâmetro interno. O que pode ser visto em sua fórmula a seguir:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_i}{P} \quad (55)$$

Para:

D_i = Diâmetro interno;

P = N° de polos.

Com a utilização de ímãs permanentes neste protótipo, tem-se a presença do fluxo magnético gerado no entreferro deste rotor, podendo então ser estimado:

$$\phi = \frac{B \cdot t_p \cdot L}{1000} \quad (56)$$

Onde:

B = Fluxo magnético no entreferro, encontrado na tabela 3;

t_p = Passo polar;

L = Comprimento do estator.

Tabela 4 - Faixa de variação de parâmetros de projetos de máquinas de fluxo axial

Parâmetros	Valores Típicos
J_a	$3 \cdot 10^6$ \longleftrightarrow $9 \cdot 10^6$ A/m ²
A_m	$8 \cdot 10^3$ \longleftrightarrow $62 \cdot 10^3$ A/m
B_{mg}	0,30 \longleftrightarrow 0,80T
B_{cs}	1,60 \longleftrightarrow 1,80T
B_{cr}	1,40 \longleftrightarrow 1,60T
k_d	0,40 \longleftrightarrow 0,80
K_{Cu}	0,41
K_{disp}	0,80 \longleftrightarrow 0,95
$\mu_r PM$	1,0 \longleftrightarrow 1,2

Fonte: Adaptado de Parviainen (2005), Libert (2004), Gieras et al. (2008), Lipo (1996) apud Maia (2011) p. 30.

De acordo com Loureiro (2008) A primeira máquina síncrona de fluxo magnético axial empregado foi o disco de Faraday, que é uma máquina homopolar, cujo registro data de 1831. Levando-se em consideração as observações feitas por Faraday podemos descrever como é definida a tensão para este tipo de máquina onde temos um campo magnético perpendicular ao rotor

Sendo esta a forma para se encontrar o campo elétrico induzido:

$$E_i = B\omega R \quad (57)$$

E para estes a diferença de potencial será:

$$E_i dr = \frac{1}{2} B\omega R^2 \quad (58)$$

CAPÍTULO VI

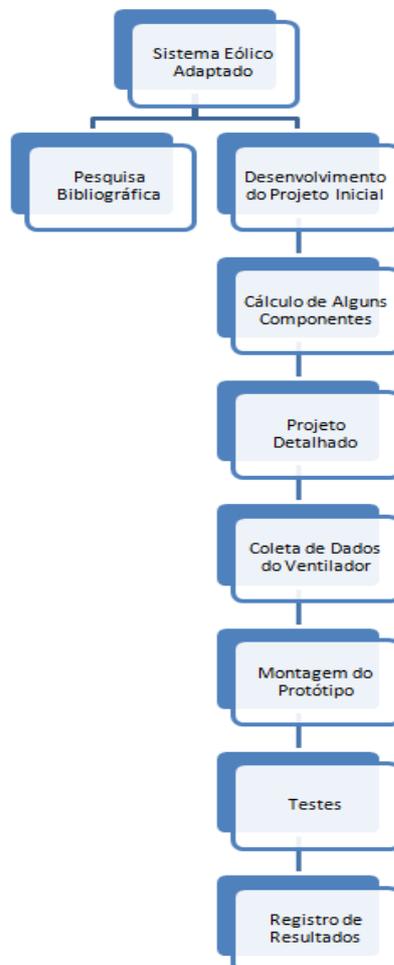
6. MÉTODO E MATERIAL

O projeto apresenta como ponto de partida uma máquina já comercializada, ventilador de teto, de forma que esta sofre algumas alterações devido a sua adaptação ao projeto descrito.

Sendo assim, foram utilizadas partes deste ventilador que realmente satisfaziam as necessidades do projeto, obtendo uma máquina de fluxo axial a imãs permanentes. Além disso, a aerodinâmica de sua construção no que diz respeito as suas pás, foi projetada de acordo com algumas referencias encontradas, para que se adequasse as necessidades e até mesmo as particularidades deste projeto.

Desta forma o fluxograma abaixo representa o planejamento resumido das etapas de construção e resultados experimentais do projeto.

Figura 50 - Fluxograma de organização do projeto.



Pesquisa bibliográfica: Nesta etapa foram feitas todas as pesquisas bibliográficas aplicadas.

Desenvolvimento do projeto inicial: Etapa onde se determinaria as particularidades, encaminhamentos, materiais específicos e desenhos preliminares.

Cálculos de alguns componentes: Etapa reservada ao dimensionamento da aerodinâmica do aerogerador.

Projeto detalhado: Onde foram gerados todos os desenhos de conjunto eólico e detalhamento de componentes.

Coleta de Dados: Nesta fase foram coletados alguns dados específicos do ventilador para a adaptação.

Montagem do Protótipo: Período utilizado à fabricação e montagem dos componentes, subconjuntos e conjuntos.

Testes: Período no qual seriam medidos e coletados os resultados e comparados com os cálculos.

Registro dos resultados: Etapa utilizada para elaborar e formatar o trabalho gráfico com suas respectivas comparações e resultados para publicação.

CAPÍTULO VII

7. TURBINA EÓLICA DE PEQUENO PORTE COM EIXO HORIZONTAL ADAPTADO DE MOTOR DE VENTILADOR ELÉTRICO

7.1. Montagem e procedimentos experimentais

O aerogerador, protótipo “AVATAR” é constituído por:

- Apoios e veios;
- Estator que contem bobinas de fio de cobre;
- Rotores que contem imãs permanentes;
- Conjunto aerodinâmico (pás e fuselagem);
- Retificador de corrente.

7.1.1. Construção dos rotores

Inicialmente fizeram-se os moldes para os rotores, tomando por base as medidas do estator adaptado de ventilador de teto, a partir deste estator foi possível encontrar o diâmetro do rotor e a quantidade necessária de imãs. A posição onde seriam alocados os imãs foi definida a partir da posição das bobinas do estator, logo estabelecida também a distância entre os mesmos, preenchendo assim toda a circunferência, dispostos da melhor forma para que pudessem gerar o campo magnético necessário.

Figura 51 – (a) Fabricação dos Rotores; (b) Rotores com imãs permanentes



(a)



(b)

Rotores com furos centrais para o rolamento e nas laterais bordas sobressalentes para fixação da estrutura. Algumas características justificaram o uso do compensado para a fabricação dos rotores sendo estas: fácil manuseio, peso e custo.

7.1.2. Adaptação do Estator

Usamos de ventilador de teto o conjunto de bobinas como sendo o estator, contando com um conjunto de 18 bobinas, fizemos algumas alterações para que este equipamento pudesse satisfazer as necessidades deste trabalho.

Figura 52 - (a) Retiragem da carcaça do ventilador; (b) Remoção de rolamentos danificados



(a)



(b)

Fonte: Autor (2016).

Além destas adequações foi necessária a usinagem do eixo, para minimizar a distancia entre rotores e estator (entre ferro) da máquina.

Figura 53 - Usinagem do eixo do estator



Fonte: Autor (2016).

7.1.3. Confeccção das pás

De acordo com os dados do projeto foi possível fabricar uma pá com 20 cm de comprimento, feita em fibra de vidro, material utilizado na fabricação das pás de um aerogerador convencional, devido á sua maior resistencia e menor peso.

Figura 54 - Usinagem de pás



Fonte: Autor (2016).

A Usinagem das pás fez-se necessária devido à diminuição da superfície de contato e conseqüentemente diminuição de peso, após isso, foram feitos furos para fixação no rotor frontal.

7.1.4. Fuselagem Frontal

Para que ocorresse a diminuição de atrito e resistência do ar, optou-se pela construção da fuselagem frontal. Esta foi feita do aproveitamento de materiais algumas partes já encontradas no próprio ventilador de teto e a adequação de uma garrafa pet.

Figura 55 - Base da fuselagem frontal



Fonte: Autor (2016).

7.1.5. Montagem do protótipo

Todas as partes prontas, partimos para junção, turbina e começamos por fixar as pás no rotor. Usamos parafusos fixação das pás, no verso do rotor frontal, além disso, uma camada de cola, para melhorar o tal ancoragem. Por fim utilizamos da cola e resina epóxi, para fixar a base da parte fuselada, concluído a parte frontal da turbina. Toda essa parte encontra-se montada e instalada na parte traseira do estator frontal, ou seja, na região em que não estão os imãs.

Figura 56 - Frente do Aerogerador protótipo "Avatar"



Fonte: Autor (2016).

Já aqui completamos a montagem da parte geratriz do aerogerador protótipo "Avatar", acoplando o rotor traseiro ao eixo do estator e em paralelo a este unimos o conjunto frontal, composto pelo rotor frontal e a parte fuselada.

Figura 57 - Vistas do protótipo "Avatar" (a) Frontal; (b) Lateral e (c) Isométrica



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor (2016).

Por fim confeccionamos uma haste metálica para servir com suporte de fixação da turbina. Adaptando suporte de ventilador. Além disso, conectamos um retificador ao circuito de saída, para conseguirmos obter os resultados dos testes em corrente contínua.

Figura 58 - Protótipo "Avatar" finalizado e ponte retificadora



Fonte: Autor (2016).

7.1.6. Ferramentas e equipamentos utilizados

Durante todo o processo de fabricação do protótipo “Avatar”, assim como em todos os testes feitos, foram necessários vários tipos de ferramentas e equipamentos de aferição, todos estes evidenciados a seguir:

- Tico-tico;
- Martelo;
- Tesoura;
- Fita isolante;
- Morsa;
- Furadeira;
- Lixadeira;
- Chave de fenda;
- Paquímetro;
- Régua;
- Multímetro;
- Anemômetro.

Por fim nesta tabela são mostradas algumas características construtivas do protótipo desenvolvido neste trabalho.

Tabela 5 - Dados referentes às dimensões do aerogerador

	Dimensão (mm)
Diâmetro externo	150
Diâmetro interno	70
Largura do entreferro	9,75
Distância entre ímãs	11
Espessura do ímã	4
Comprimento do ímã	14
Largura do estator	27,5
Largura do rotor frontal	16
Largura do rotor traseiro	16
Testa da bobina	35
Comprimento total do gerador	670
Comprimento da pá	200
Espessura da pá	2
Diâmetro maior do bico	140
Diâmetro menor do bico	28
Comprimento do bico	120

Fonte: Autor (2016).

CAPÍTULO VIII

8. RESULTADOS E DISCUSSÕES

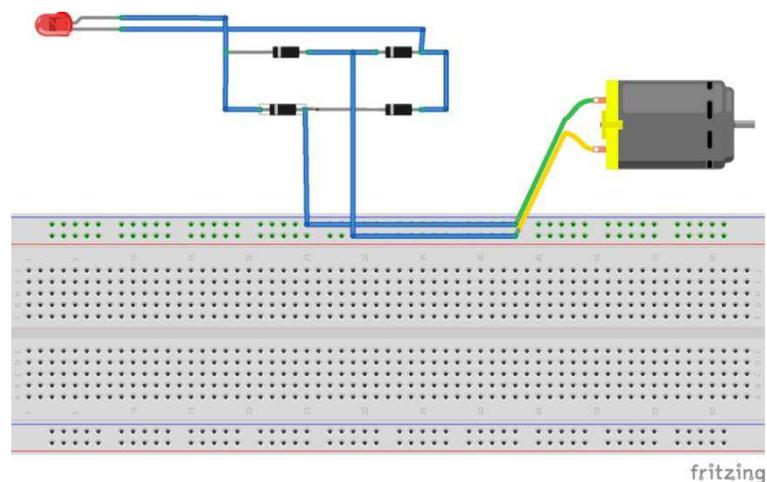
8.1. Testes

Começamos por relatar que durante nossos testes os resultados foram muitos satisfatórios, pois conseguimos realmente fundamentar nosso título. Segue abaixo a tabela com alguns de nossos valores encontrados na prática.

Testes realizados na Avenida Ferreira Goulart, esse foi um dos fatores importantes, pois essa avenida encontra-se perto da orla marítima, o que influencia na geração de energia. Acoplando o protótipo em um automóvel do tipo saveiro, ancorado na parte superior da cabine. Este se encontra conectado a um retificador de 4 A e 500 V, o que nos garantiria os resultados em corrente contínua. Além disso, fizemos o uso de um anemômetro, usado na aferição da velocidade do vento e o multímetro, para mensurar a tensão gerada.

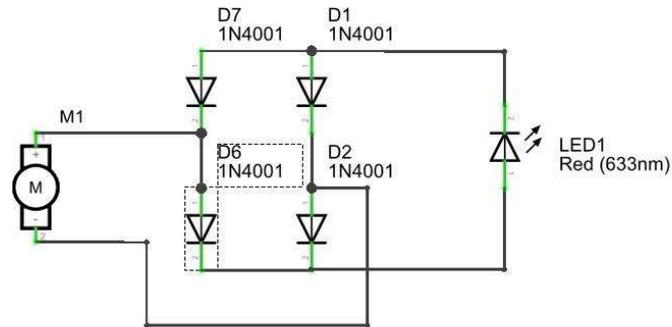
A figura 59 mostra um esboço do tipo de ligação feita para que houvesse a averiguação de valores, ou seja, os testes.

Figura 59 - Esquema de ligação para testes usando fritzing



Fonte: Autor (2016).

Figura 60 - Circuito de ligação para testes usando Fritzing



fritzing

Fonte: Autor (2016).

Estes dois esquemas mostram de forma bem dinâmica a forma como foram feitas as conexões para os testes, sendo o retificador conectado ao gerador em paralelo e este por sua vez conectado em paralelo com o led. Para aferirmos os valores de tensão só precisamos substituir o led pelo multímetro.

Tabela 6 - Resultados obtidos nos testes

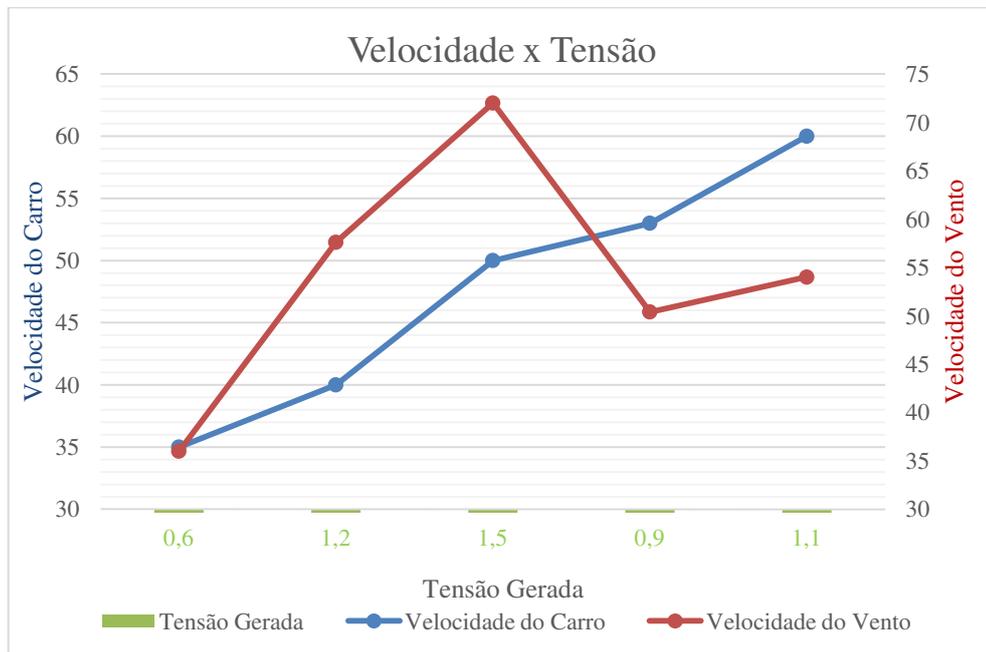
Velocidade do Carro (Km/h)	Velocidade do Vento (Km/h)	Tensão Gerada (V)
35	36	0,6
40	57,6	1,2
50	72	1,5
53	50,4	0,9
60	54	1,1

Fonte: Autor (2016).

Pode-se notar que a velocidade do carro e a velocidade do vento, são fatores diferentes, ou seja, são variáveis que indicam cada uma a seu modo, a sua parcela de contribuição na geração de energia, mas os testes foram feitos em condições reais e adversas onde às vezes a velocidade do carro estava maior e a velocidade do vento menor e vice e versa, nesse caso tivemos grande incidência de brisas marítimas, pois estávamos na orla.

É certo que quanto maior a velocidade do vento, maior foi a tensão produzida e que conseguimos detectar, com apenas 50 km/h de velocidade do carro chegamos a 72 km/h de velocidade máxima do vento e conseguimos com isso 1,5 V de tensão, o gráfico a seguir ilustra esses resultados.

Gráfico 1 - Relação entre velocidade do carro, velocidade do vento e tensão gerada nos testes do protótipo "Avatar"



Fonte: Autor (2016).

Como o protótipo apresenta 18 bobinas, verificamos a resistência total da turbina de 231,8 ohm e tendo obtido, em testes, tensão máxima de 1,5 volts torna-se possível encontrar o valor da corrente, este sendo 0,005 Ampéres, em aproximadamente um minuto de testes mantendo constantes alguns parâmetros: a velocidade do carro e a velocidade do vento.

$$U_T = R_T \cdot I \quad (59)$$

$$I = 0,005 A \quad (60)$$

Então para um minuto, como já dito, em condições constantes, temos 0,005 Ampéres. Projetando isso para uma hora temos a seguinte equação matemática:

$$I_{hora} = \frac{60 \text{ minutos} \cdot 0,005 \text{ Ampéres}}{1 \text{ minuto}} \quad (61)$$

$$I_{hora} = 0,3 A \quad (62)$$

Levando em conta que uma bateria de carro convencional tem e torno de 60 A façamos agora os cálculos para saber em quanto tempo, mantendo as condições citadas, de trabalho do gerador, para carregar este tipo de bateria.

$$T = \frac{1\text{ hora} \cdot 60\text{Ampéres}}{0,3\text{ Ampéres}} \quad (63)$$

$$T = 200\text{ horas.} \quad (64)$$

Supondo que o uso diário do automóvel seja de aproximadamente três horas, estas duzentas horas seriam convertidas em 67 dias de uso contínuo, para que houvesse o carregamento completo de sua bateria.

8.2. Avaliação de custos

Todo projeto ao ser iniciado deve ser estudado e feita comparações dos custos e benefícios para decidir a sua conveniência de construção e utilização. Desta forma montamos essa tabela que informa o custo relativo deste projeto.

Tabela 7 - Tabela de custos dos componentes utilizados

DESCRIÇÃO	ESPECIFICAÇÃO	QUANT.	PREÇO	PREÇO
			UNITÁRIO	TOTAL
			(R\$)	(R\$)
Estator de Ventilador de Teto	Ranhurado, Monofásico, 18 bobinas.	1	142,4*	142,4*
Imãs de Neodímio	4 x 10 mm	36	2,5	90,00
Rolamento	6201 RS	2	6	12
Bases de Compensado	1,5 x 16 cm	2	2,5	5,00
Parte Fuselada	Plástico Cônico Adaptado	1	10,00*	10,00*
	Barra Rosqueada 3/8	1	8,16	
Conjunto	Porca galvanizada sextavada 3/8	16	0,25	15,36
Porca/Barra/Arruela	Arruela lisa 3/8	16	0,2	
Resina Epóxi	50g	1	6	6
Adesivo Instantâneo	2g	1	2,5	2,5
Ponte Retificadora	RS405L	1	1,00	1,00
	Marceneiro		50	
Mão de obra	Torneiro Mecânico	-	20	90,00
	Soldador		20	
			TOTAL	374,26

Fonte: Autor (2016).

Obs*.: Valores assumidos de acordo com pesquisa de mercado, pois estes materiais assinalados foram doados ao projeto.

Tendo em vista que o custo deste projeto foi abaixo do esperado para o tipo de benefícios que este pode gerar, acredita-se que tenhamos uma relação de custo-benefício bem

considerável, apesar de alguns itens essenciais, para sua construção terem sido concedido por parceiros ao longo do projeto.

CAPÍTULO IX

9. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Do trabalho que foi realizado é possível afirmar que todos os objetivos foram alcançados quase em sua totalidade. Uma vez que o sistema eólico foi projetado, construído e testado, utilizando materiais de fácil aquisição e baixo custo como mostrado na tabela de materiais. O estudo ofereceu também uma nova visão no que diz respeito à avaliação da eficiência de turbinas eólicas de eixo horizontal, onde confrontou trabalhos já publicados com dados encontrados em nosso protótipo, levando em consideração as características de cada tipo de gerador estudado.

Os testes descreveram um resultado que justificou o título deste trabalho, que há a possibilidade de gerar energia para veículos automotores e não de ser autossuficiente. Com isso acredita-se que os resultados mostram a viabilidade deste projeto, provando atender as expectativas impostas nos objetivos.

Chegou-se no ponto que um leque de estudos pode ser feito sobre tal protejo, visto que com algumas otimizações, tais como: uso de ímãs mais potentes ou até mesmo usando caixa de engrenagens, mudando assim a classificação do tipo de gerador, uso de materiais mais nobres e de melhores características em várias partes da turbina, aumento da quantidade de turbinas acopladas ao veículo, dentre outras.

Enfim mesmo com os objetivos alcançados nota-se que ainda há muitas melhorias que podem ser feitas para se obter um resultado mais satisfatório. Tendo em vista que, este pode ter sido o precursor deste tipo de ideia, no que diz respeito à forma de utilização da energia gerada por turbinas eólicas.

REFERÊNCIAS

ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica. **As normas técnicas obrigatórias para os aerogeradores.** Disponível em <<http://portalabeeolica.org.br>>. Acesso em 19 de maio de 2016.

ACKERMAN, T. **Wind power in power systems.** Chichester, England, Jhon Wiley, 2005, 68 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 2. ed. Brasília: ANNEL, 2002. 153 p.

AIRFOIL TOOLS – Disponível em <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=goe602-il#polars>>. Acesso em 19 de maio de 2016.

ALMEIDA, Maurício Soares de. **Implementação computacional para desenvolvimento de pás de turbinas eólicas de eixo horizontal.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2013.

AMMONIT. **Energia eólica: Importância, historia e cálculo de energia eólica.** Ammonit Measurement GmbH Wrasngelstrasse 100, 10997 Berlin/Alemanha. Disponível em <<http://www.ammonit.com/pt/energia-eolica/energia-eolica#top>>. Acesso em: 15 de março de 2016.

BENITO, Tomás Perales. **Práticas de Energia Eólica.** Porto: Publindustria edições técnicas, 2012.

BRIZON, Diane et al. **Energia eólica: principio de funcionamento.** Disponível em:<<http://elee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Generalites/GeneralitesEolien1.htm>>. Acesso em: 15 de março de 2016.

CABALLERO, A.L.; **Generación Asincrónica: su aplicación a las Fuentes energéticas renovables.** 252p. Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia – Centro de Investigaciones

y Pruebas Electroenergeticas, Instituto Superior Politecnico Jose Antonio Echeverria, La Habana, Cuba.

Construir um Gerador. Disponível em: <<http://www.electronicapt.com/geradorimaspermanentes>> Acesso em 23 de maio de 2016

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia eólica princípios e tecnologias.** CEPEL – Grupo Eletrobrás. 2008.

CUSTODIO, R. D. S; **Energia Eólica para produção de energia elétrica** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2009, 280 p.

DIEZ, P. F. **Energia eólica.** Tese (Doutorado) – Universidade de Cantábria – departamento de engenharia elétrica e energética, 2003.

ELETRÔNICA DE POTÊNCIA. Disponível em <www.corradi.junior.nom.br> 88p. Acesso em: 10 de dezembro de 2016.

FERREIRA, Ângela Paula Barbosa da Silva. **Projecto de uma Máquina de Ímanes Permanentes de Fluxo Axial Orientado para os Sistemas de Conversão de Energia Eólica.** 2011. 283p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2011.

FIGUEIREDO, J. A. G., Gamboa, P. V., Silvestre, M. A. Departamento de Ciências Aeroespaciais Universidade da Beira Interior Covilhã, Portugal. 2010.

GIERAS, J.F.; WANG, Rj.; KAMPER, Maarten J. **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines.** Springer, 2008.

GONZALEZ, Facundo Enrique. **Estudo das forças atuantes em mecanismos de regulação de ângulo de passo e desenvolvimento de um sistema emulador de cargas.** 2012. 168p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

- HENN, Érico Antônio Lopes. **Máquinas de Fluido**. 2. ed. Santa Maria: Ed. da UFSM, 2006.
- INEGI, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. **Tecnologias de aproveitamento energético offshore**. 2014
- JHA, A. H. **Wind Turbine Technology**. CRC Press, Boca Raton, Florida. 2011.
- JUNIOR, Ivoni Carlos Acunha. **Análise do Desempenho de um Aerogerador de Pequeno Porte**. 2006. 100p. Dissertação (mestrado em engenharia oceânica) - Universidade Federal do Rio Grande, Engenharia Oceânica. 2006.
- LINARD, Flávio José Alexandre. **Projeto de um gerador com ímãs permanentes e fluxo axial de 50 kw para aplicação em geração eólica distribuída**. 2014. 84 f.: il. color., enc. ; 30 cm. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Fortaleza, 2014.
- LOUREIRO, Luiz Tiarajú dos Reis. **Um Estudo Sobre a Máquina Torus**. 2008. 106p. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.
- LUCIANO, Benedito Antonio, SILVA, Sissi Alves da. **Sobre os ímãs permanentes e suas aplicações na Eletroeletrônica**. Departamento de Engenharia Elétrica. Centro de Ciências e Tecnologia - Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande - PB
- MACHADO, Ana Claudia. **AEROGERADOR. Desenvolvimento de uma turbina eólica**. 2015. Projeto de Pesquisa - Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas/MG. 2015
- MACHADO, Caio Filippo de Faria. **Projeto de uma turbina eólica de eixo horizontal**. 2014. 65 p.: il.; 29,7 cm. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Rio de Janeiro. 2014

MAIA, Thales Alexandre Carvalho. **Projeto e Construção de um Gerador a Ímãs Permanentes de Fluxo Axial para Turbina Eólica de Pequena Potência**. 2011. 165p. Dissertação (mestrado em engenharia elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais. 2011.

MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2a. ed. West Sussex, England: Wiley, 2001.

NUNES JUNIOR, Éden Rodrigues. **Metodologia de projeto de turbinas eólicas de pequeno porte**. 2008. 188 f.:il. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro.Faculdade de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

PINTO, Jaime Soares; PASA, Michael Everton; MICHELS, Ademar. **Dimensionamento das Pás de Aerogerador de Eixo Horizontal para Instalação em uma Propriedade Rural**. In: 3ª SIEF – Semana Internacional das Engenharias da FAHOR, 10. 2013, Horizontina/RS:FAHOR, 2013. Disponível em: <http://www.fahor.com.br/publicacoes/sief/2013/dimensionamento_das_pas.> Acesso em 23 de maio de 2016.

PIRES, Júlio Cesar Pinheiro. **Estudo de rotor para turbina eólica de eixo horizontal de pequeno porte com aplicação de modelagem e simulação virtual**. 2011. 102p. Dissertação (mestrado em Design) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Faculdade de Arquitetura. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

REIS, Thiago. **Com o aumento da frota, país tem 1 automóvel para cada 4 habitantes**. G1/SP. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2014/03/com-o-aumento-da-frota-pais-tem-1-automovel-para-cada-4-habitantes.html>>

ROCHA, Rafael Vieira. **Simulação de Aerogerador em uma Bancada Experimental**. Tese (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

RODRIGUES, José Carlos. **Aeromodelismo – Teórico e Prático**. Edição digital, 2004. Disponível em: <<http://www.fpam.pt/informacoes/LivroAeromodelismo.pdf>.> Acesso em: 25 de março de 2016.

RODRIGUES, Paulo Roberto. **Energias Renováveis: Energia Eólica**. Consórcio de Universidades Europeias e Latino-Americanas em Energias Renováveis – JELARE. Livro Digital. 2011

SILVA, Adilson. **Ímãs permanentes**. Italpro. 2012. Disponível em: <<http://italpro.com.br/ele-troimas-blog/imas-permanentes/>>. Acesso em: 01 dez. 2016.

SILVA, Amanda Briggs. **Projeto Aerodinâmico de Turbinas Eólicas**. 2013. Monografia – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, Eduardo Ribeiro Rei Gomes da. **Projeto de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal**. 2013. 67 p.: il.; 29,7 cm. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica - Curso de Engenharia Mecânica VIII. Rio de Janeiro. 2013

SMITH, Adam. **A riqueza das nações**: Investigação sobre a sua natureza e suas causas. São Paulo: Abril Cultural, (1983[1776]).

TARNOWSKI, G.C.; **Metodologia de regulação de potência ativa para operação de sistemas de geração eólica com aerogeradores de velocidade variável**, dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, UFRGS, Porto Alegre 2006

TIBOLA, Gabriel. **Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência**. 2009. 285f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica.) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

WENZEL, G. M. **Projeto Aerodinâmico de Pás de Turbinas Eólicas De Eixo Horizontal**. 2007. 74 p. Monografia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – Departamento de Engenharia Mecânica e Mecatrônica, Porto Alegre, RS. 2007

APÊNDICE A – Configuração Aerodinâmica

Dr - Diâmetro do rotor

$$Dr = 0,40 \text{ m}$$

Np - Número de pás

$$Np = 3$$

U - Velocidade do vento

$$U = 12 \text{ m/s}$$

Ar - Área do rotor

$$Ar = \pi \cdot \frac{Dr^2}{4}$$

$$Ar = 0,126 \text{ m}^2$$

Db - Diâmetro do bosso

$$Db = 0,25 \text{ m}$$

ρ - Densidade do ar

$$\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

c - Corda

$$c = 0,125 \text{ m}$$

Ap - Área da superfície da pá

$$Ap = \frac{(Dr - Db)}{2} c$$

$$Ap = 0,009 \text{ m}^2$$

σ - Solidez do rotor

$$\sigma = \frac{(Np \cdot Ap)}{Ar}$$

$$\sigma = 0,2239$$

λ - Tip Speed Ratio

$$\lambda = 5$$

Cp - Coeficiente de potência

$$Cp = 0,4$$

Pv - Potência do vento

$$Pv = \frac{Ar \cdot U^3 \cdot \rho}{2}$$

$$Pv = 132,94 \text{ w}$$

Pr - Potência aproveitada pelo rotor

$$Pr = Cp \cdot Pv$$

$$Pr = 53,18 \text{ w}$$

ω - Velocidade angular do rotor

$$\omega = \lambda \cdot \frac{U}{\frac{Dr}{2}}$$

$$\omega = 300 \frac{1}{s}$$

$$\omega = 2865,33 \text{ rpm}$$

W - Velocidade relativa do vento

$$W = U^2 + \left(\omega \cdot \frac{Dr}{2} \right)^2$$

$$W = 61,188 \text{ m/s}$$

v - Viscosidade cinemática do ar

$$v = 1,5111 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{\text{m}^2}{s}$$

Re - Número de Reynolds

$$\mathbf{Re} = \frac{U \cdot c}{\nu}$$

$$\mathbf{Re} = 10 \cdot 10^4$$

α - Ângulo de ataque

$$\alpha = 6,5^\circ$$

ϕ - Ângulo de escoamento

$$\phi = \text{atan}\left(\frac{U}{\omega \frac{Dr}{2}}\right)$$

$$\phi = 0,46^\circ$$

Cd - Coeficiente de arrasto

$$\mathbf{Cd} = 0,01829$$

Cl - Coeficiente de sustentação

$$\mathbf{Cl} = 1,0530$$

T - Torque

$$T = \frac{1}{16} \rho W^2 n_p c (Cl \sin \phi - Cd \cos \phi) (Dr^2 - Db^2)$$

$$\mathbf{T} = 0,1034 \text{ N.m}$$

Fx - Força axial

$$Fx = \frac{1}{4} \rho W^2 n_p c (Cl \cos \phi - Cd \sin \phi) (Dr - Db)$$

$$\mathbf{Fx} = 67,9 \text{ N}$$

APÊNDICE B – Configuração Elétrica

Número de polos:

$$p = \frac{120fg}{n}$$

$$p = 18$$

Passo Polar:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_i}{P}$$

$$t_p = 12,21 \text{ mm}$$

Ângulo Mecânico:

$$\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$$

$$\theta_e = 0,7 \text{ rad}$$

Fluxo Magnético:

$$\phi = \frac{B \cdot t_p \cdot L}{1000}$$

$$\phi = 0,002 \text{ Wb}$$

Frequência do Gerador

$$f_g = \frac{p \omega_{rpm}}{2 \cdot 60}$$

$$f_g = 199,14 \text{ Hz}$$

Diferença de Potencial – Tensão:

$$E_i dr = \frac{1}{2} B \omega R^2$$

$$E_i dr = 6 \text{ V}$$

Frequência angular:

$$\omega_e = \frac{p}{2} \omega_m$$

$$\omega_e = 1251 \text{ rad/s}$$

APÊNDICE C – Protótipo “Avatar”