

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE
TURBINA EÓLICA DE BAIXA POTÊNCIA

Henrique Simonsen

São Paulo
2010

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE
TURBINA EÓLICA DE BAIXA POTÊNCIA**

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Henrique Simonsen

Orientador: Prof. Eitaro Yamane

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2010

FICHA CATALOGRÁFICA

Simonsen, Henrique

Projeto e construção de um gerador eólico de baixa potência para uso residencial / H. Simonsen. – São Paulo, 2010.

71 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Projeto mecânico 2.Energia eólica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos superam quaisquer palavras que aqui escrevo, e vão além do sentido de agradecer a contribuição que muitas pessoas exerceram para a conclusão deste trabalho; afinal muitas delas nem sabem que me ajudaram diretamente nesta tarefa. Desta forma, agradeço de coração àqueles que puderam me enriquecer até este momento de minha vida, e deixo aqui apenas seus apelidos. Caco. Nussi. Teco. Dani. Esteeeeer!!. Vó(zinha). Vô. Du. Brunão. Brunão (outro). Rê. Maya. Alininha!(saudades). Cláclá. Mumu. Grigri. Manu. Chris. Beijo. Nanda..... . “Brothers”. Meninas da fisioterapia (Su, Fabi e Simone). São pessoas que possuo um carinho e admiração imensuráveis. E faltam nomes.

E meus sinceros agradecimentos ao meu professor e orientador Eitaro Yamane.

Obrigado a todos. De verdade...

RESUMO

O presente trabalho estuda a aplicação de três diferentes tipos de turbina eólica de pequeno porte para uso residencial. A intenção é verificar a potência que pode ser extraída do vento para cada configuração. Pesquisas bibliográficas e estudos sobre equipamentos similares foram importantes para inspirar a criação de um modelo simples e flexível que fosse capaz de acomodar as três configurações, utilizando uma estrutura básica feita essencialmente de materiais reutilizados. A energia extraída do vento por meio de turbinas eólicas de pequeno porte é limitada em termos de eficiência e altamente variável, mas que mesmo assim pode ser utilizada para diversas aplicações. O uso consciente da energia é um tema de grande importância na atualidade, sendo responsabilidade do ser humano de fazer um melhor uso dela, independente de sua quantidade.

ABSTRACT

This work studies the application of three different small wind turbines for residential use. The intention is to verify the power that can be extracted from the wind for each configuration. Studies about similar equipments were important to inspire the creation of a simple and flexible prototype that could satisfy all the three configurations, through a basic structure made essentially of reused materials. The energy extracted from the wind is limited in terms of efficiency and highly variable when using small wind turbines, but that doesn't mean it can't be used for several applications. The consciousness and reasonable use of energy is a global issue nowadays, and it is our responsibility to make a better use of it, independent of its quantity.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ESCOPO.....	1
1.2. MOTIVACAO	1
2. QUADRO ENERGÉTICO MUNDIAL.....	6
2. 1. ENERGIA EÓLICA NO MUNDO.....	9
2. 2. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL.....	12
2. 3. O RECURSO EÓLICO.....	16
2.3.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	16
2.3.1.1. ENERGIA DOS VENTOS	16
2.3.1.2. RENDIMENTO MÁXIMO IDEAL: LEI DE BETZ.....	18
2.3.1.3. PRINCÍPIO FÍSICO.....	20
2.3.2. TIPOS DE AEROGERADORES.....	23
2.3.3. COMPONENTES DE UM GERADOR EÓLICO.....	27
2.3.4. ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UM AEROGERADOR.....	31
3. PROJETO BÁSICO	34
3.1. OBJETIVOS.....	34
3.2. IDEALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO	35
3.3. ESTUDO TEÓRICO E MODELOS MATEMÁTICOS.....	38
3.3.1. HAWT – “CATAVENTO”	38
3.3.2. VAWT – ROTOR DO TIPO H (fólios).....	42
3.3.3. VAWT - SAVONIUS.....	49

4. PROJETO EXECUTIVO.....	51
4.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS	51
4.1.1. HAWT – “CATAVENTO”	51
4.1.2. VAWT – ROTOR DO TIPO H (fólios).....	53
4.1.3. VAWT - SAVONIUS.....	56
4.2. METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS.....	57
4.3. RESULTADOS.....	59
5. CONCLUSÃO	65
6. ANEXOS	67
7. BIBLIOGRAFIA	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Indústria predomina no consumo de energia no país.....	2
Figura 2: Consumo final de energia elétrica por setores.....	3
Figura 3: Consumo elétrico por habitante no Brasil.....	4
Figura 4: Taxas médias de crescimento de consumos elétrico, petrolífero e energético no mundo.....	6
Figura 5: Matriz Energética Mundial.....	7
Figura 6: Matriz Energética Brasileira.....	7
Figura 7: Novos investimentos mundiais em Energia Sustentável, 2002-2008.....	8
Figura 8: Novos investimentos financeiros por tecnologia.....	9
Figura 9: Potencial eólico estimado para vento médio igual ou superior a 7,0 m/s..	12
Figura 10: Complementaridade Eólica-Hídrica.....	13
Figura 11: Custo de produção de eletricidade de diversas fontes.....	14
Figura 12: Leilão Energia Eólica de novembro de 2009.....	16
Figura 13: Esquema de passagem do vento através um cilindro oco.....	17
Figura 14: Esquema simplificado do escoamento de ar em uma turbina eólica.....	18
Figura 15: Comportamento típico dos coeficientes de sustentação e de arrasto segundo ângulo de ataque.....	21
Figura 16: Diagrama de forças na pá da turbina.....	22
Figura 17: HAWT tripala.....	24
Figura 18: Turbina Savonius.....	25
Figura 19: Fluxo de ar na turbina Savonius.....	25
Figura 20: Funcionamento de uma turbina Darrieus e a curva polar do momento produzido em função da posição.....	26
Figura 21: Diversos tipos de forma construtiva de turbina eólica.....	26
Figura 22: Componentes de uma turbina de eixo horizontal.	28
Figura 23: Dependência do coeficiente de potência com λ para diversos tipos de turbina.....	31
Figura 24: Dependência de C_p com o ângulo de passo (δ) para uma mesma turbina.....	32
Figura 25: Curvas de C_p para diferentes tipos de turbina.....	33
Figura 26: Localização da residência.....	34
Figura 27: Rolamento SKF 61800-2RS1.....	37

Figura 28: Estrutura utilizada para turbina de eixo horizontal.....	37
Figura 28: Estrutura utilizada para turbina de eixo vertical.....	37
Figura 30: Direção do vento local.....	39
Figura 31: Geometria dos vetores que atuam numa seção da pá.....	40
Figura 32: Esquema ilustrativo da turbina de rotor do tipo H (fólios).....	42
Figura 33: Perfil de um NACA0017.....	43
Figura 34: Estudo geométrico sobre os fólios de uma VAWT.....	44
Figura 35: Cl em função do ângulo de ataque.....	46
Figura 36: Cd em função do ângulo de ataque.....	46
Figura 37: Esquema ilustrativo de uma turbina Savonius modificada – 3 pás.....	49
Figura 38: Vista superior de uma turbina do tipo Savonius.....	50
Figura 39: Formato da pá da turbina do tipo cata-vento (conceito inicial).....	51
Figura 40: Detalhe ilustrativo da fixação das pás da turbina de rotor do tipo H (fólio) nos aros das rodas.....	52
Figura 41: Detalhes construtivos da fixação das pás da turbina de rotor do tipo H (fólio) nos aros das rodas.....	52
Figura 42: Gabarito (chapa de aço) e o laminado (meio perfil do fólio).....	53
Figuras 43 e 44: Detalhes da montagem final do fólio (para fixação nas rodas).....	54
Figura 45: Detalhe do esquema de fixação adotado.....	55
Figura 46: Detalhe da fixação do fólio nos aros das rodas.....	55
Figura 47: Montagem final do fólio na roda.....	55
Figura 48: Esquema de montagem de uma pá da turbina do tipo Savonius nos aros das rodas.....	56
Figura 49: Montagem final da turbina do tipo Savonius (3 “pás”).....	57
Figura 50: Anemômetro manual utilizado.....	57
Figura 51: Detalhe da polia utilizada para medição.....	58
Figura 52: Desempenho da turbina do tipo cata-vento em função da velocidade do vento.....	60
Figura 53: Desempenho da turbina de rotor do tipo H em função da velocidade do vento.....	62
Figura 54: Desempenho da turbina do tipo Savonius em função da velocidade do vento.....	64
Figura 55: Vista explodida da estrutura básica.....	67
Figura 56: VAWT (fólios).....	67
Figura 57: HAWT (catavento).....	68
Figura 58: VAWT (Savonius).....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial eólico instalado em diversos países do mundo até 2008.....	11
Tabela 2: Estimativa da eficiência de uma turbina de eixo horizontal do tipo cata-vento.....	41
Tabela 3: Análise teórica para a turbina vertical do tipo H (5 fólios).....	48
Tabela 4: Resultados obtidos experimentalmente para a turbina de eixo horizontal do tipo cata-vento.....	59
Tabela 5: Resultados obtidos experimentalmente para a turbina de eixo vertical de rotor do tipo H (fólios)	61
Tabela 6: Resultados obtidos experimentalmente para a turbina de eixo vertical do tipo Savonius.....	63

1. INTRODUÇÃO

1.1. ESCOPO

O objetivo deste trabalho é projetar, construir e aplicar três protótipos diversos de turbina eólica de pequeno porte para gerar uma energia que possa ser aproveitada pelo usuário.

Inicialmente o trabalho descreve sobre questões energéticas mundiais e o papel da energia eólica nesse contexto. Em seguida é feita uma breve descrição teórica sobre seu aproveitamento e as diferentes formas de como pode ocorrer essa captação (tipos de turbinas), para então tratar do estudo teórico e aplicação real de aerogeradores de baixa potência em uma residência. A intenção é mostrar ao leitor a possibilidade e viabilidade do aproveitamento da energia contida no vento mesmo com recursos limitados à nossa disposição.

1.2. MOTIVACAO

Segundo a definição criada pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, desenvolvimento sustentável é aquele capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações; é o desenvolvimento que não esgota os recursos para o futuro.

Quando a revolução industrial teve seu início, no século XVIII, a preocupação com a degradação do meio ambiente não era uma pauta relevante comparada com o anseio ao desenvolvimento econômico dos países. Grandes parques industriais com elevadas emissões atmosféricas eram comuns no mundo e isso não era tão relevante, desde que os mesmos tivessem o comprometimento com seu próprio desenvolvimento. Mas crescimento econômico significa mais fábricas, mais emprego, mais gente indo de carro para o trabalho, mais consumo de energia, mais queima de petróleo e gás e, como resultado, também mais poluentes no ar.

Com o passar dos anos, além de se verificar efeitos causados diretamente sobre a qualidade de vida humana, percebeu-se que as conseqüências da poluição e degradação do meio ambiente possuem dimensões mundiais, e provavelmente

irreversíveis. A preocupação da ONU e o interesse cada vez maior do público com a utilização indiscriminada dos recursos naturais levou à realização da Conferência sobre o Meio Ambiente em Estocolmo em 1972, não demorando muito para a criação de outras conferências internacionais que apelassem para tratados mundiais com a intenção de se minimizar a problemática da degradação do meio ambiente.

Os esforços de setores industriais e de geração de energia em restabelecer suas emissões com as mais novas tecnologias, mantendo o comprometimento com o desenvolvimento sustentável, são crescentes. Mais do que isso, novos mercados surgem embasados no conceito de sustentabilidade, fontes renováveis são elevadas a pedestais e incentivadas por governos, além de programas de conscientização e educação ambiental serem estimulados constantemente.

De fato, o setor industrial e corporativo é aquele que responde pela maior parte do consumo de energia (vide gráfico 1) e pela maior quantidade de poluentes emitidos no mundo, levando-nos à rápida conclusão de que comprometer-se com o desenvolvimento sustentável é uma “obrigação” de todas as empresas que queiram sobreviver na economia globalizada. Seria errôneo, no entanto, pensar que essa responsabilidade com o desenvolvimento sustentável cabe somente às grandes indústrias, às grandes geradoras de eletricidade, aos grandes empreendimentos civis, etc. Tão importantes quanto àqueles mencionados anteriormente, somos nós, cidadãos.

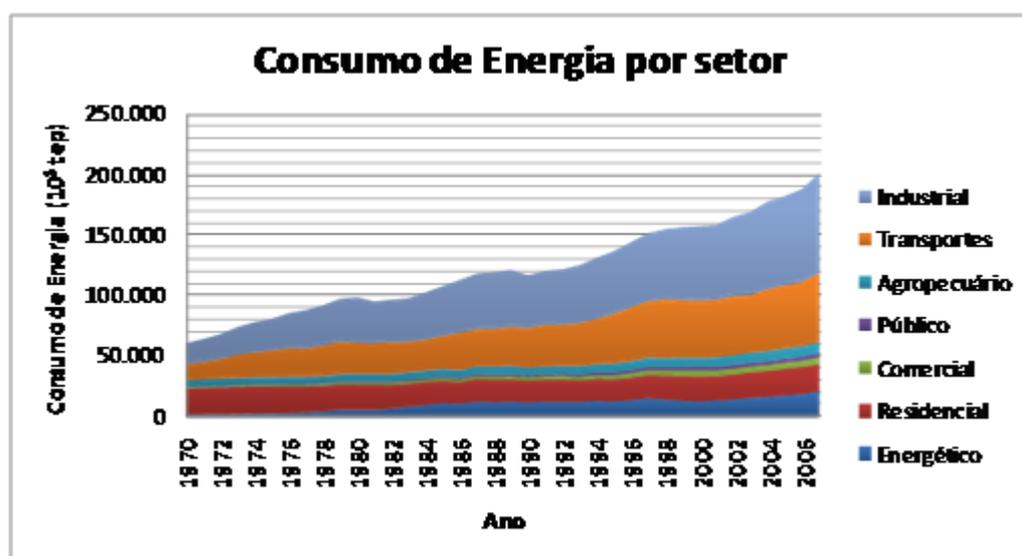


Figura 1: Indústria predomina no consumo de energia no país. Fonte: BEN2008

A figura 3 ilustra o consumo de energia elétrica no Brasil de 1970 a 2007, com base nos dados obtidos dos balanços energéticos divulgados pela EPE (Empresa de Pesquisa Energética). Os setores industriais, comerciais e residenciais respondem por mais de 80% de toda a energia elétrica consumida no país. Considerando somente o setor residencial, constata-se que é o responsável por 22% de toda a energia elétrica consumida no país, perdendo somente para o setor industrial, o qual responde por aproximadamente 47%. Como se pode observar, o consumo de energia elétrica residencial nesse período passou de aproximadamente 8,4 TWh para 90,92 TWh, o que corresponde a uma taxa de crescimento anual de cerca de 6,6% a.a., associado ao rápido crescimento populacional, ao aumento da renda e à ligação de domicílios que não eram atendidos por redes elétricas.

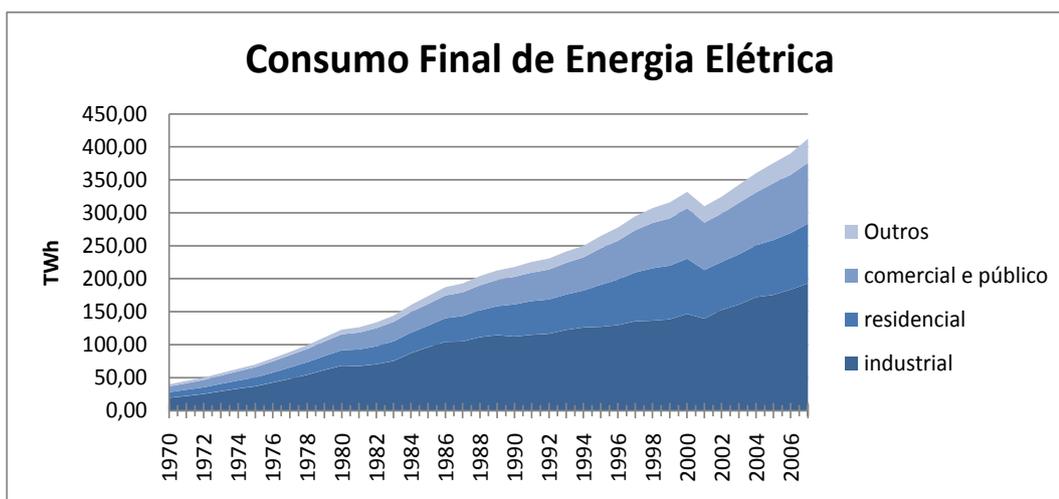


Figura 2: Consumo final de energia elétrica por setores. [1]

É interessante também observar a relação de consumo elétrico per capita. Para tanto, foram considerados dados do IBGE sobre a contagem populacional do país, fornecendo-nos os resultados apresentados na figura 3.

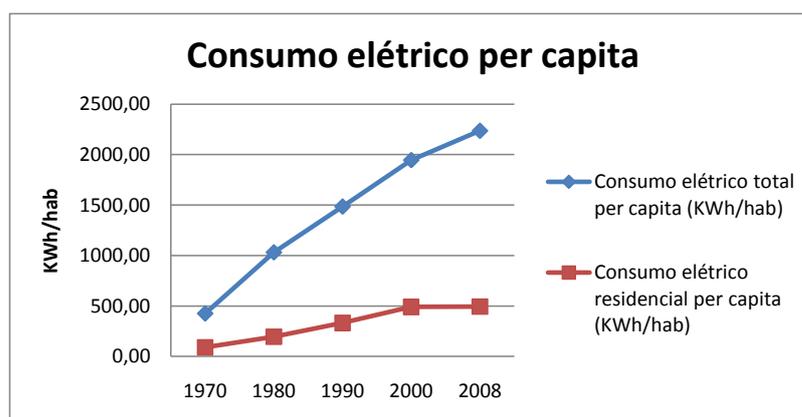


Figura 3: Consumo elétrico por habitante no Brasil. Fonte: BEN2009 e IBGE.

O consumo elétrico per capita fortifica o argumento da crescente demanda do país por energia elétrica, fruto do próprio crescimento econômico nacional e populacional. O que podemos aferir é que embora o consumo elétrico total por habitante apresentasse contínuo crescimento, o mesmo não ocorreu com o consumo elétrico residencial por indivíduo. Afirmar que a tendência deste último tenderá a decrescer é precipitado. Uma interpretação coerente é a de que o acesso à energia elétrica tenha abrangido quase a totalidade da população nacional na última década, acompanhando o crescimento da população desde então.

No entanto, analisar o consumo elétrico por números não é suficiente para avaliar se uma nação preza mais ou menos pela sustentabilidade e pelo uso de tecnologias verdes: se toda a energia de um país fosse gerada por painéis fotovoltaicos, os dados seriam os mesmos, pois o que nos importa é a energia consumida, qualquer que seja a sua proveniência.

Tudo o que consumimos, que usamos, que criamos, que descartamos ou que economizamos contribui, de alguma forma ou de outra, para a questão da sustentabilidade. Há de se concordar que são participações muito humildes se as analisarmos de forma individual. Totalizando, porém, fica evidente que temos um grande papel e contribuição para o sucesso do desenvolvimento sustentável do país.

Além disso, a prática de uma consciência ecológica deve estar associada à economia de capital. Segundo professor do departamento de engenharia de produção da Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, Aldo Roberto Ometto, tratar da sustentabilidade como obrigação, somente por aspectos legais, pode impossibilitar a

incorporação de melhores práticas e dificulta a percepção de que sustentabilidade traz ganhos econômicos.

Diante dessa realidade, inúmeros projetos para cooperar com o desenvolvimento sustentável de maneira localizada estão sendo sempre incentivados, como podemos observar com inúmeras ONGs, projetos de cunho social e contribuições pessoais de pessoas simpatizantes.

Este trabalho se insere neste contexto: da mesma forma que outros estudos experimentais sobre a utilização da energia eólica serviu de inspiração e base para a realização deste, deseja-se também contribuir e estimular outros indivíduos à iniciativa da criação de um projeto que agregue informações pertinentes sobre o aproveitamento da energia eólica, mesmo que de maneira localizada e limitada.

2. QUADRO ENERGÉTICO MUNDIAL

Uma das grandes problemáticas que o mundo enfrenta na atualidade é a questão de como atender ao substancial crescimento da demanda energética diante da disponibilidade limitada de recursos. Segundo relatório Brasil Sustentável, realizado pela Ernst & Young, estima-se um crescimento de 26% do consumo de energia até o ano de 2030. Neste futuro cenário, acredita-se que os países que terão o maior insumo são aqueles que registrarão as maiores taxas de crescimento econômico, como a China e Índia, que apresentam aumento de consumo da ordem de 4,9% e 3,8% ao ano, respectivamente. O relatório ainda afirma que o crescimento do consumo mundial de energia elétrica será de 41%, e o de petróleo, de 18%.

O gráfico a seguir revela a taxa média dos crescimentos de consumo de petróleo, elétrico e energético em diversas nações do mundo. É interessante observar que os países em desenvolvimento são os que apresentam as maiores taxas de crescimento no consumo de energia, com destaque para Brasil, Índia e China, enquanto que países desenvolvidos apresentam taxas de crescimento mais modestas.

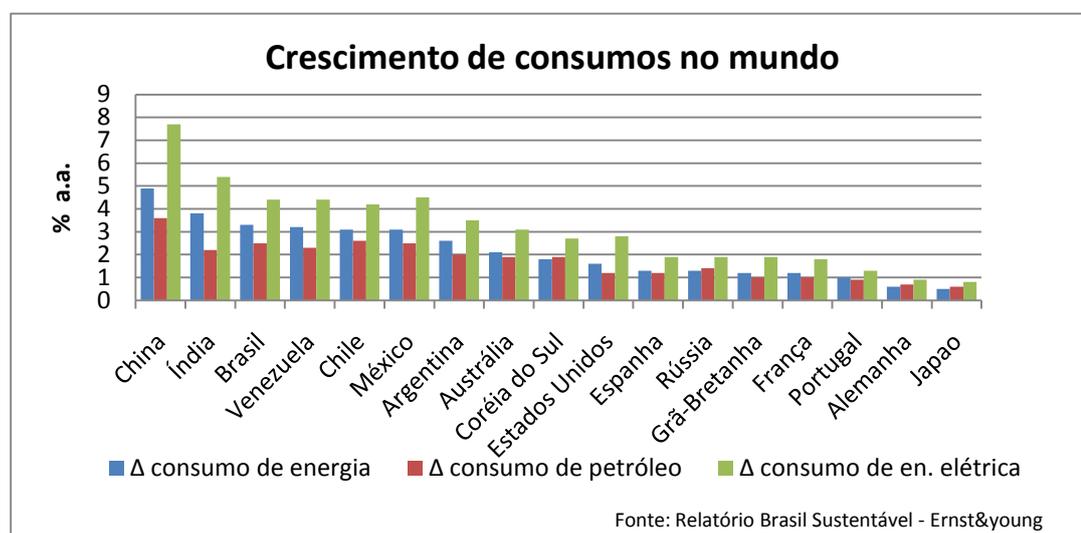


Figura 4: Taxas médias de crescimento de consumos elétrico, petrolífero e energético no mundo

Considerando a energia elétrica gerada no mundo, a matriz energética mundial ainda é predominante no que se refere às fontes não renováveis, como observado na figura 5, com dados obtidos da Agência Internacional de Energia (IEA). A participação de fontes renováveis na geração de eletricidade do mundo é de pouco mais que 14%, considerado definitivamente baixo quando comparado com a do

Brasil, que responde por mais de 75% da oferta de energia elétrica nacional (vide figura 6).

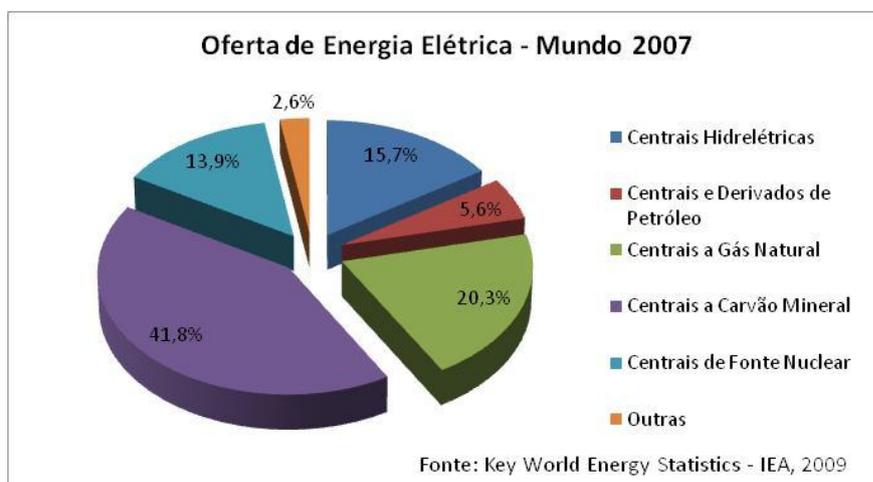


Figura 5: Matriz Energética Mundial

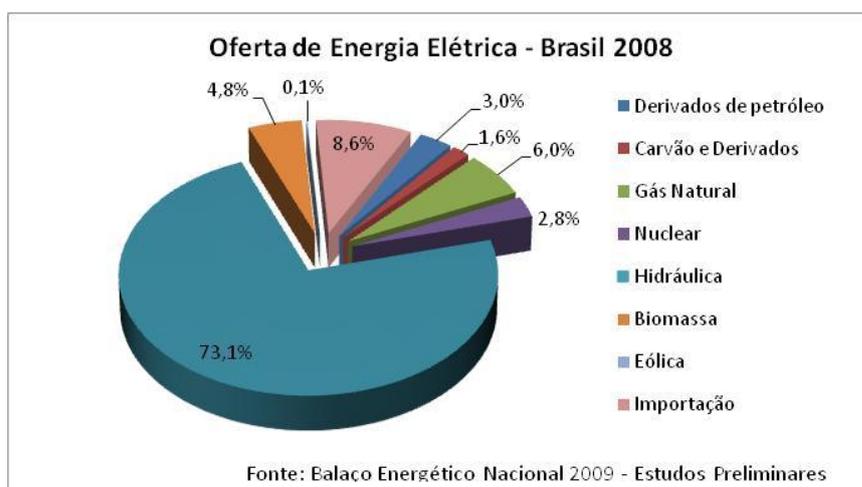


Figura 6: Matriz Energética Brasileira

Segundo artigo publicado na National Geographic de outubro de 2009, a eletricidade que poderia ser gerada no mundo com base em fontes renováveis é estimada em 975.010 TWh, o que equivale a cerca de 50 vezes a mais que a energia que é hoje gerada (19.771 TWh em 2007, segundo dados do relatório estatístico da IEA). Porém, o acesso à geração elétrica através de tecnologias limpas pode ser difícil para muitos países, seja pela deficiência de recursos naturais, seja pelos elevados custos que exigem.

A boa notícia é que comprometidos com o desenvolvimento sustentável e preservação do meio ambiente da Terra, as nações estão se dedicando notoriamente à diminuição das emissões atmosféricas, adotando como principal veículo para realização desse objetivo o investimento no uso de fontes renováveis e de novas tecnologias mais limpas. Dados mostram que os investimentos destinados ao uso de energias renováveis saltaram de US\$ 148 bilhões, em 2007, para US\$ 155 bilhões, em 2008, correspondendo um acréscimo de 5% nesse segmento. [2]

Destes US\$ 155 bilhões, a energia eólica é líder em novos investimentos, com um montante de US\$ 51,8 bilhões (acréscimo de 1% em relação a 2007), mostrando-se como a alternativa mais madura e melhor estabilizada entre as alternativas sustentáveis no mundo. Já a energia solar recebeu US\$ 33,5 bilhões (acréscimo de 49% em relação ao ano de 2007). Em seguida se encontra o setor de biocombustíveis, com US\$ 16,9 bilhões (queda de 9% em comparação ao ano de 2007). Juntos, esses três setores somam 86% dos novos investimentos dedicados à área.

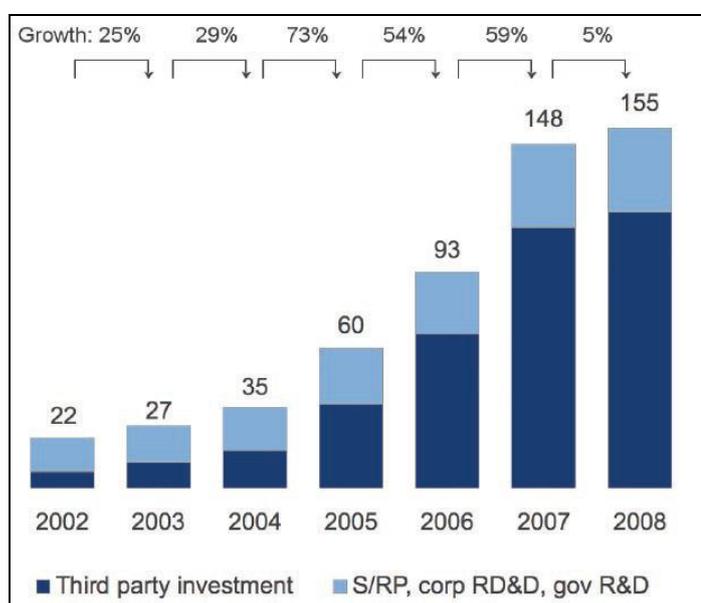


Figura 7: Novos investimentos mundiais em Energia Sustentável, 2002-2008, \$ billions. S/RP = small/residence projects. Fonte: New Energy Finance

Nota-se, porém, que a taxa de incremento de investimento em relação à 2007 foi apenas de 5%, em contraste com taxas superiores a 50% nos anos anteriores. Segundo o mesmo relatório, isso é explicado principalmente pela crise financeira

mundial, que teve um impacto significativo em investimento no segundo semestre do ano de 2008. [2]

A figura a seguir mostra o montante dos investimentos destinados às diferentes tecnologias limpas, para o ano de 2008, com as respectivas taxas de crescimento em relação ao ano de 2007.

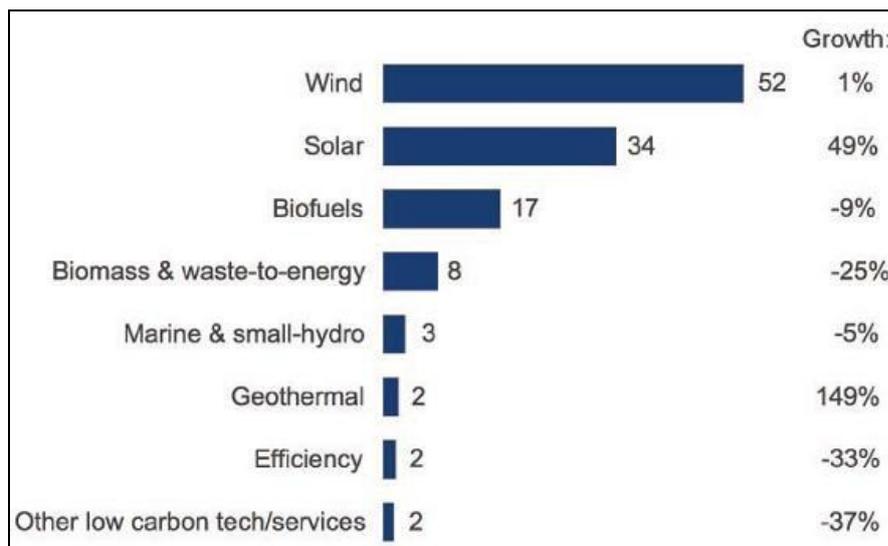


Figura 8: Novos investimentos financeiros por tecnologia, 2008, e crescimento sobre 2007, \$billions. Fonte: New Energy Finance

2. 1. ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

A utilização da energia dos ventos data desde tempos remotos, na utilização de moinhos de grãos quando não se dispunha de cursos de água como força motriz dos mesmos. Seu uso foi-se disseminando e, no decorrer do século XVII ao século XIX, sofreu grande diversificação e importante papel para o bombeamento de água, sistemas de drenagem, produção de óleos vegetais, fabricação de papel e outros usos em países como a Bélgica, Inglaterra, França e Holanda.

A chegada da revolução industrial, no entanto, resultou num declínio do uso da energia eólica, permanecendo restrito nas áreas rurais. Com o avanço da rede elétrica, no século XX, incentivos à pesquisa para o aproveitamento da energia eólica começou a tomar forma, com o intuito de desenvolver e utilizar turbinas eólicas de médio porte para suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas, apesar da competitividade econômica de combustíveis fósseis, cujas reservas eram cada vez

mais abundantes no mundo e que colaboravam para o abandono dos projetos de energia eólica.

A Segunda Guerra Mundial foi um momento de prosperidade para o setor eólico, uma vez que países em geral empenharam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis. Entretanto, esse cenário durou pouco tempo: após o fim da mesma, os combustíveis fósseis voltaram a ser o recurso mais explorado em todo o mundo, até a ocorrência do choque do petróleo, na década de 70.

A partir de então, novos investimentos em pesquisa em energia eólica foram feitos. Viu-se a necessidade de diversificação da matriz energética como uma importante decisão estratégica e, ao mesmo tempo em que as preocupações sobre as questões climáticas eram crescentes, o comércio de aerogeradores teve um rápido desenvolvimento.

Segundo relatório de Energia Eólica Mundial de 2008 (World Wind Energy Report), a energia eólica é considerada como a fonte energética que apresenta o maior crescimento dinâmico na atualidade. Em comparação com o ano de 2005, instalações de aerogeradores no ano de 2008 mais que dobraram.

Dados do final do ano de 2008 mostram que o potencial eólico instalado no mundo é cerca de 120 GW. Depois do potencial hidrelétrico, isso corresponde à 2^a maior contribuição no uso de energias renováveis no cenário mundial. No ano de 2008, a liderança era exercida pelos Estados Unidos, que apresentava pouco mais de 25 GW instalados, seguido da Alemanha, com aproximadamente 23 GW. A tabela 1 a seguir mostra a utilização internacional da energia eólica nos últimos anos.^[3]

PAÍS	Potência acumulada ao final de cada ano [MW]											
	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
Estados Unidos	25.170,0	16.818,8	11.603,0	9.149,0	6.752,0	6.352,0	4.685,0	4.258,0	2.564,0	2.534,0	1.820,0	1.673,0
Alemanha	23.902,8	22.247,4	20.622,0	18.427,5	16.628,0	14.609,0	12.400,0	8.754,0	6.095,0	4.443,0	2.875,0	2.081,0
Espanha	16.740,3	15.145,1	11.630,0	10.027,9	8.263,0	6.202,0	4.830,0	3.337,0	2.535,0	1.542,0	834,0	512,0
China	12.210,0	5.912,0	2.599,0	1.266,0	764,0	566,0	468,0	404,0	352,0	262,0	500,0	166,0
Índia	9.587,0	7.850,0	6.270,0	4.430,0	2.983,0	2.120,0	1.702,0	1.500,0	1.260,0	1.035,0	992,0	940,0
Itália	3.736,0	2.726,1	2.123,4	1.718,3	1.265,0	891,0	785,0	697,0	427,0	183,0	178,0	103,0
França	3.404,0	2.455,0	1.567,0	757,2	390,0	240,0	131,0	116,0	63,0	25,0	21,0	10,0
Reino Unido	3.287,9	2.389,0	1.962,9	1.353,0	897,0	704,0	552,0	483,0	409,0	347,0	333,0	319,0
Dinamarca	3.160,0	3.125,0	3.136,0	3.128,0	3.118,0	3.115,0	2.880,0	2.534,0	2.415,0	1.771,0	1.383,0	1.148,0
Portugal	2.862,0	2.130,0	1.716,0	1.022,0	523,0	299,0	194,0	153,0	111,0	61,0	51,0	38,0
Canadá	2.369,0	1.846,0	1.460,0	683,0	444,0	326,0	221,0	198,0	137,0	125,0	82,0	25,0
Holanda	2.225,0	1.747,0	1.559,0	1.224,0	1.078,0	912,0	686,0	497,0	442,0	411,0	361,0	319,0
Japão	1.880,0	1.528,0	1.309,0	1.040,0	940,0	644,0	415,0	316,0	142,0	68,0	30,0	18,0
Austrália	1.494,0	817,3	817,3	579,0	380,0	198,0	104,0	71,0	30,0	9,0	9,0	11,0
Irlanda	1.244,7	805,0	746,0	495,2	353,0	225,0	137,0	125,0	119,0	73,0	73,0	53,0
Suécia	1.066,9	831,0	571,2	509,1	442,0	399,0	328,0	290,0	241,0	215,0	174,0	122,0
Áustria	994,9	981,5	964,5	819,0	607,0	415,0	139,0	95,0	77,0	42,0	30,0	20,0
Grécia	989,7	873,3	757,6	573,3	466,0	398,0	276,0	299,0	274,0	158,0	55,0	29,0
Polónia	472,0	276,0	153,0	73,0	58,0	58,0	27,0	51,0	5,0	5,0	5,0	2,0
Noruega	428,0	333,0	325,0	268,0	160,0	112,0	97,0	17,0	13,0	9,0	9,0	4,0
Egito	390,0	310,0	230,0	145,0	145,0	69,0	69,0	69,0	69,0	36,0	6,0	5,0
Bélgica	383,6	286,9	194,3	167,4	97,0	68,0	44,0	31,0	13,0	6,0	6,0	4,0
Taiwan	358,2	279,9	187,7	103,7	nd	nd						
Brasil	338,5	247,1	236,9	28,6	28,6	28,6	24,0	24,0	22,0	17,0	17,0	3,0
Turquia	333,4	206,8	64,6	20,1	20,0	20,0	19,0	19,0	19,0	9,0	9,0	-
Nova Zelândia	325,3	321,8	171,0	168,2	170,0	38,0	35,0	35,0	35,0	24,0	24,0	4,0
Coreia do Sul	278,0	192,1	176,3	119,1	8,0	8,0	nd	nd	nd	nd	nd	2,0
Bulgária	157,5	56,9	36,0	14,0	nd	nd						
República Tcheca	150,0	116,0	56,5	29,5	nd	nd						
Finlândia	140,0	110,0	86,0	82,0	82,0	47,0	41,0	39,0	39,0	18,0	18,0	12,0
Hungria	127,0	65,0	60,9	17,5	nd	nd						
Marrocos	125,2	125,2	64,0	64,0	54,0	54,0	54,0	54,0	54,0	14,0	nd	nd
Ucrânia	90,0	89,0	85,6	77,3	57,0	51,0	nd	nd	nd	nd	nd	5,0
México	85,0	85,0	84,0	2,2	nd	nd						
Irã	82,0	66,5	47,4	31,6	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0	11,0
Estónia	78,3	58,6	33,0	33,0	nd	nd						
Costa Rica	74,0	74,0	74,0	71,0	71,0	71,0	71,0	71,0	51,0	51,0	27,0	20,0
Lituânia	54,4	52,3	55,0	7,0	nd	nd						
Luxemburgo	35,3	35,3	35,3	35,3	35,0	16,0	16,0	15,0	15,0	9,0	9,0	2,0
Letónia	30,0	27,4	27,4	27,4	nd	nd						
Argentina	29,8	29,8	27,8	26,8	26,0	26,0	27,0	27,0	16,0	14,0	14,0	9,0
Outros Países	298,2	254,7	225,2	210,9	239,0	141,0	569,0	337,0	394,0	405,0	197,0	22,0
Total	121.188	93.927	74.151	59.024	47.555	39.434	32.037	24.927	18.449	13.932	10.153	7.692

(Fonte: WWEA, 2009, 2008, 2006, WINDPOWER MONTHLY, 2004, 2006, NEW ENERGY, 2003, 2002, 2000, BTM CONSULT, 2000)

Tabela 1: Potencial eólico instalado em diversos países do mundo até 2008.

Observa-se do gráfico que a atual posição de liderança dos Estados Unidos foi conquistada somente neste ano, após superar a Alemanha em geração eólica. A China, por sua vez, revela-se como uma nação que está concentrando muitos investimentos no mesmo recurso: teve seu potencial instalado dobrado no período de 2007 a 2008. Motivos que explicam esse crescimento acentuado do país asiático é a sua forte dependência em fontes energéticas não renováveis, com uma matriz

energética que apresenta 70% de sua totalidade de uso do carvão, constituindo, junto com os Estados Unidos, um dos países que mais contribuem com a emissão de poluentes no mundo.

2. 2. ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

Apesar da contribuição da energia eólica na matriz energética brasileira ser muito pequena, o Brasil possui um potencial eólico enorme. Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro de 2001, documento produzido pelo Centro de Pesquisas de Energia (Cepel) da Eletrobrás, somente o Nordeste possui mais de 75 GW de potencial efetivo para geração eólica, de um total estimado de 143,5GW. Mesmo assim, esses números devem ser atualizados: estudos feitos pela organização mostram que o potencial eólico é maior que o estimado em 2001. Dados preliminares do novo Atlas Eólico Nacional, que estará disponível em 2010, apontaram para mais de 250 GW, baseado em uma medição de 100 mts de altura (referência [4]).

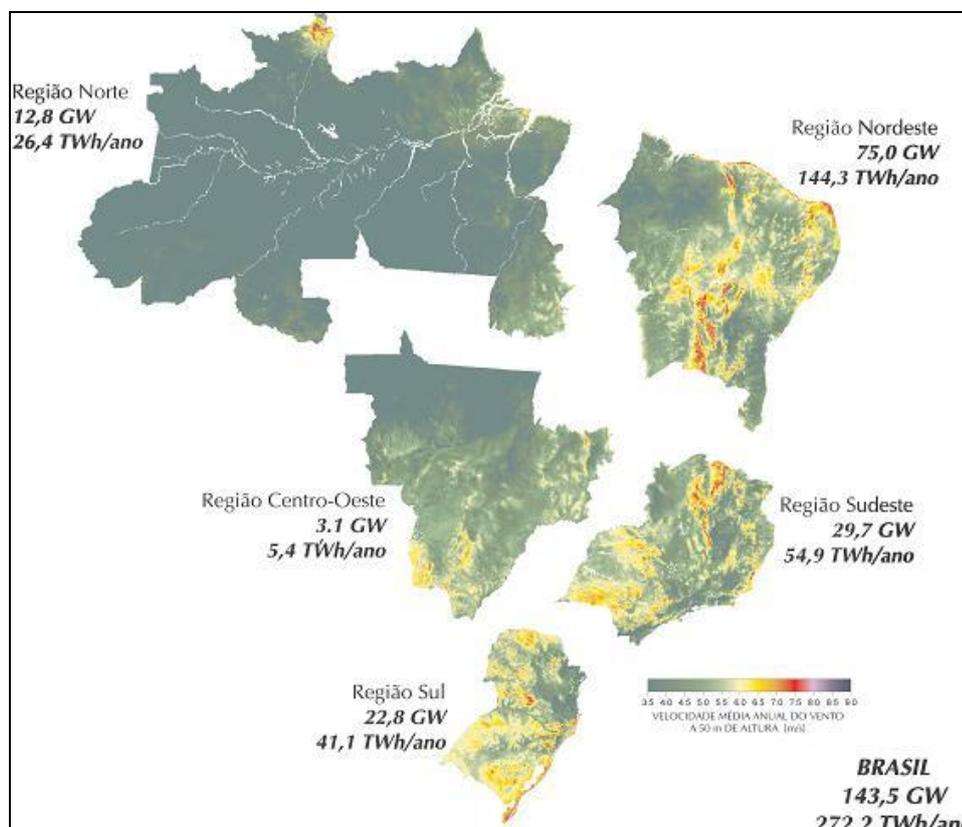


Figura 9: Potencial eólico estimado para vento médio igual ou superior a 7,0 m/s.
Fonte: CEPEL/Eletrobrás 2001

Conforme apresentação do presidente da ABEEólica Lauro Fiúza Junior, no 10º Encontro Internacional de Energia organizado pela FIESP, o parque eólico instalado possui hoje uma potência de aproximadamente 547 MW (set/09). Até o final do ano de 2009, prevê-se um total de 797 MW e, para o fim de 2012, de 1427 MW [5].

Além de ser uma fonte de energia limpa, a Energia Eólica é também estimulada pela sua complementaridade à geração hidrelétrica, visto que o maior potencial eólico, na região do Nordeste, ocorre durante o período de menor disponibilidade hídrica. Isso possibilita que em períodos onde há maior escassez de água, a energia eólica poderia estar sendo utilizada para complementar essa queda de energia, hoje promovida por termelétricas. A figura 10 mostra a potência gerada de empreendimentos eólicos e hidrelétricos da região Nordeste do País, mostrando uma complementaridade sazonal entre as duas fontes de energia.

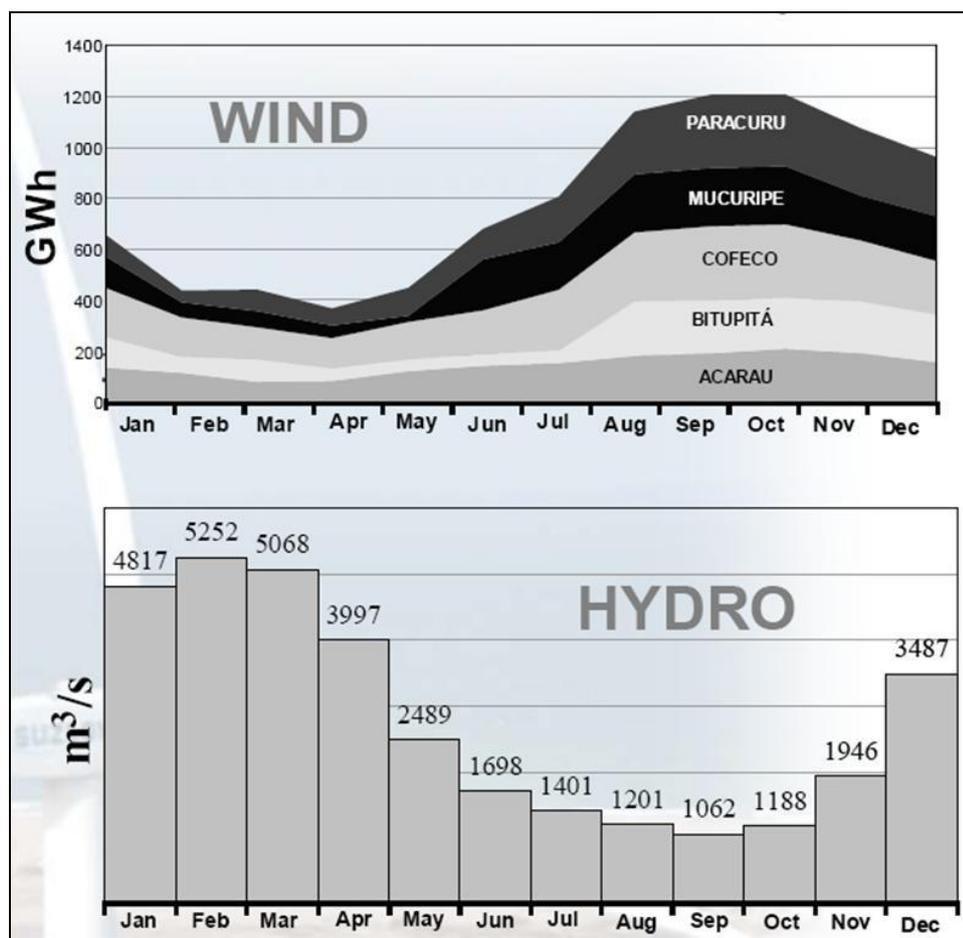


Figura 10: Complementaridade Eólica-Hídrica. Fonte: FIESP

Considerando ainda a viabilidade econômica da instalação de um parque eólico no atual cenário mundial, verifica-se que o custo por KWh compete com outras formas de geração de energia, observado na figura 11 a seguir. Além disso, deve-se considerar que existe uma tendência de que o custo por KWh cresça nos próximos anos para plantas de geração de energia que utilizam combustíveis fósseis, dada a preocupação em se reduzir as emissões de gases estufas dos mesmos, que por sua vez implica novos investimentos em tecnologias e equipamentos.

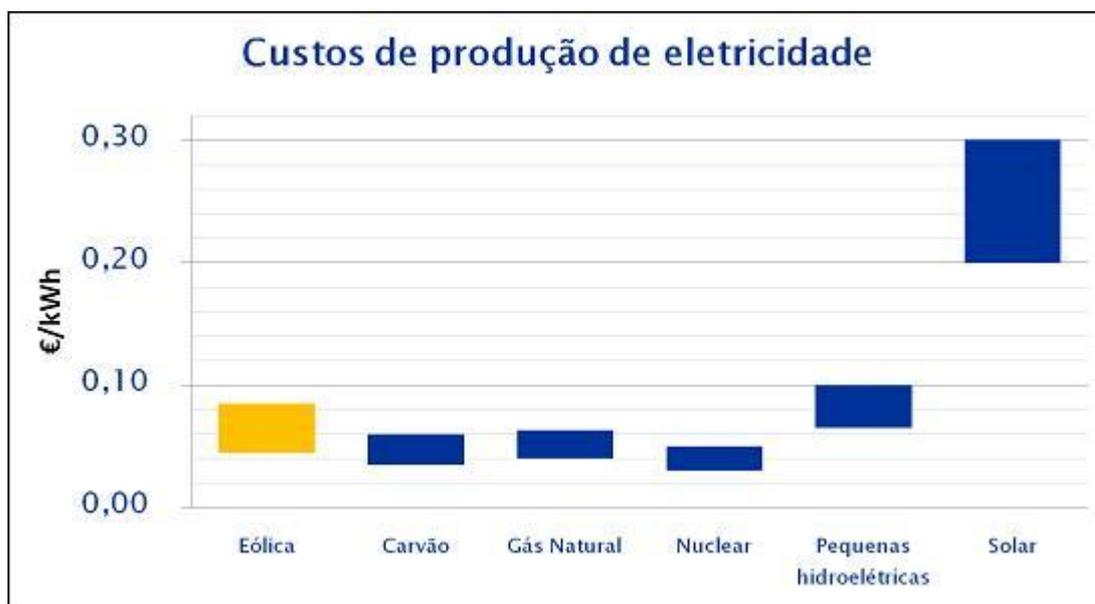


Figura 11: Custo de produção de eletricidade de diversas fontes.
 Fonte: EIA. "International Energy Outlook"

Qual seria o motivo então da energia eólica não ser aproveitada no Brasil, dada sua grande capacidade? Apesar do crescimento de Energia Eólica estar ocorrendo no território nacional, critica-se muito o fato do potencial eólico brasileiro não ser bem aproveitado, uma vez que o mesmo não utiliza nem 1% de seu potencial disponível.

Primeiramente, a energia eólica é competitiva sim, mas em outros países. No Brasil, os empreendedores alegam que a tarifa viabilizadora da energia eólica seria de R\$ 0,21/KWh, equivalendo a uma tarifa de US\$ 0,10, com base na taxa de câmbio média de de R\$ 2,03, verificada nos últimos 48 meses. Esta tarifa é superior à tarifa de R\$ 0,15 exigida pelas usinas de biomassa, por exemplo. Além disso, em países onde o uso da energia eólica se encontra mais avançado, a tarifa tinge US\$ 0,04. Os motivos principais que explicam esse cenário da energia eólica no Brasil são a falta

de concorrência de empresas nacionais (número restrito de ofertantes nacionais de aerogeradores), barreiras à importação e elevados custos logísticos de implementação dos projetos. ^[6]

Segundo Eliane Amaral Fadigas, professora e pesquisadora do Departamento de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da USP, muitos projetos não saíram do papel, explicado pela falta de interesses dos investidores. Especialistas acreditam que o motivo disso foi o fato do governo não ter sido capaz de criar condições para atrair investidores, apesar da colaboração do Programa de Incentivo às Fontes Renováveis (PROINFA), gerenciado pela Eletrobrás.

O alto índice de nacionalização de equipamentos e serviços nas centrais eólicas criado pelo PROINFA está sendo criticado por especialistas, embora tenha sido imposto para estimular a indústria nacional no desenvolvimento de aerogeradores. Segundo eles, esse alto valor é prejudicial para o crescimento da energia eólica no país: a existência de poucos fabricantes encarece o projeto do empreendimento e o fato da maioria da produção local ser exportada não garante a satisfação da demanda.

Mesmo com PROINFA e com o primeiro Leilão de Energia Eólica de novembro 2009 (vide figura 12), algumas medidas como a desoneração tributária dos investimentos é dita como necessidade para o desenvolvimento do parque eólico nacional, juntamente com a consolidação de um marco regulatório e de leilões a longo prazo. Medidas como essas poderiam estimular empresas internacionais a se instalar no país, que no momento se encontram um pouco receosas com o mercado eólico brasileiro.

A Empresa de Pesquisa Energética do Ministério de Minas e Energia (EPE/MME) cadastrou 441 projetos para o leilão de energia eólica, totalizando uma capacidade de 13341 MW espalhados por 11 estados da nação.

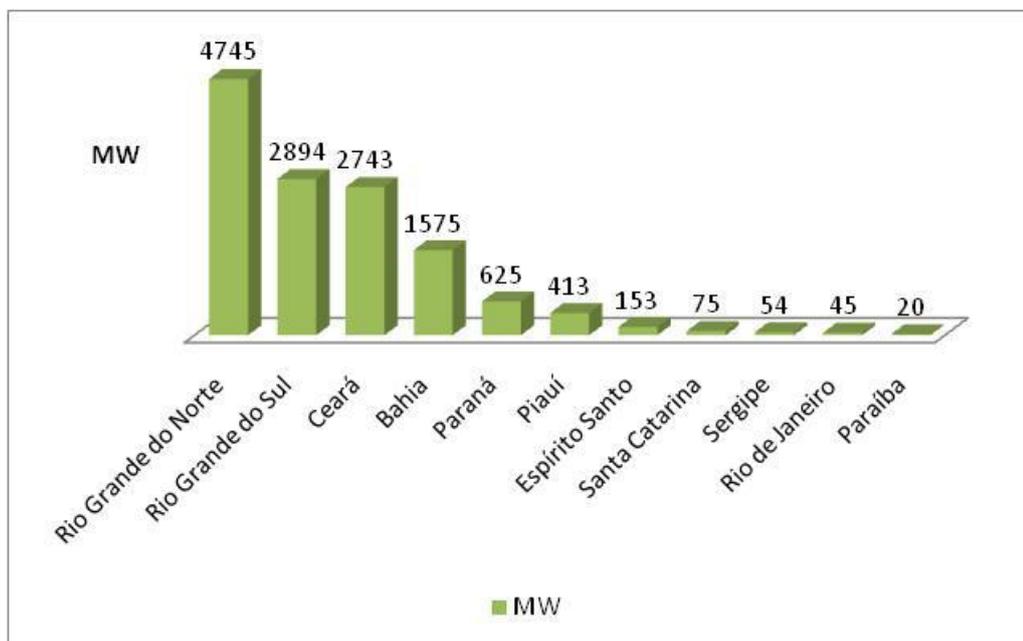


Figura 12: Leilão Energia Eólica 2009. Fonte: EPE [7]

2.3. O RECURSO EÓLICO

2.3.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

2.3.1.1. ENERGIA DOS VENTOS

A ocorrência de ventos é resultado da diferença de pressão e temperatura em diferentes regiões da superfície terrestre, que por sua vez é causada pela não uniformidade do aquecimento da superfície terrestre pelo sol. O ar mais quente é menos denso e tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais fria e mais densa. Esse deslocamento de massas determina a formação de ventos.

A velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias, devendo-se considerar os fatores que contribuem no regime de ventos. Dentre eles, destacam-se:

- variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

O princípio de funcionamento de um gerador eólico tradicional é a extração da energia cinética proveniente do vento. As pás absorvem essa energia, movimentando o rotor da turbina que, por sua vez, pode acionar um gerador elétrico, um conjunto moto-bomba, um pistão hidráulico etc. A absorção da energia dos ventos pelas pás se dá tanto pelas forças de sustentação como de arraste, sendo que a contribuição de cada uma para a rotação do rotor depende do tipo de turbina utilizada.

A energia disponível no vento pode ser obtida considerando-se o escoamento do vento a uma velocidade (v) passando, durante um intervalo de tempo Δt , através de um cilindro oco de área circular (A) e comprimento (ΔL), conforme esquematizado na figura 13 a seguir.

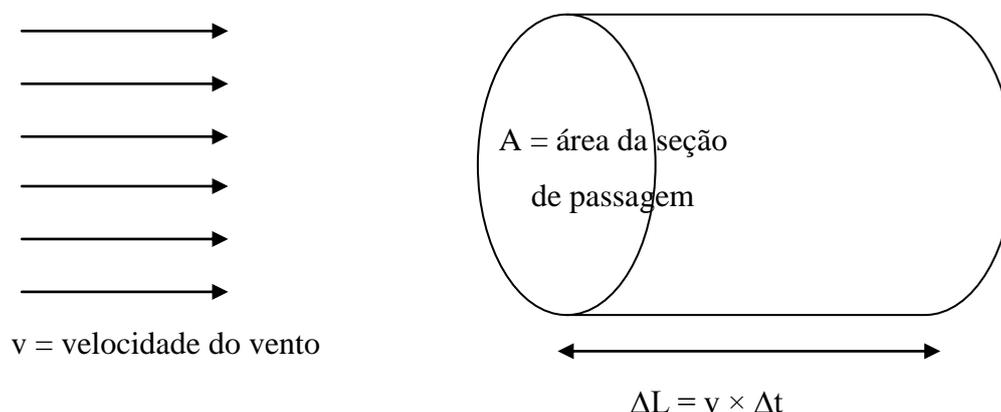


Figura 13: Esquema de passagem do vento através um cilindro oco

A energia associada ao movimento de volume $A \times L$ é dada por:

$$E = \frac{1}{2} \cdot A \cdot L \cdot \rho \cdot v^2 \quad (2.1)$$

Mas como:

$$\Delta L = v \cdot \Delta t \quad (2.2)$$

Temos, considerando que a potência é a quantidade de energia por unidade de tempo, que:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \frac{dL}{dt} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (2.3)$$

Essa seria a potência correspondente à conversão total da energia aerodinâmica em energia mecânica.

2.3.1.2. RENDIMENTO MÁXIMO IDEAL: LEI DE BETZ

A energia contida nos ventos não pode ser integralmente aproveitada e apresenta um limite teórico, deduzido pelo físico alemão Albert Betz.

Consideremos um fluxo de ar que passa através do rotor conforme apresentado na figura 14. A montante, o ar possui uma velocidade v_1 e uma seção de passagem A_1 . Aproximando-se do rotor, crescem a pressão e a área de passagem do fluxo de ar, enquanto a velocidade sofre redução. Assim que o fluxo de ar passa pelo rotor, observa-se uma queda brusca na pressão e a velocidade diminui ainda mais. Afastando do rotor, a pressão retorna a p_{atm} , enquanto que a velocidade atinge um valor v_2 menor que v_1 , já que parte da energia foi absorvida. Para os cálculos, supõe-se escoamento incompressível, regime permanente, sem atrito e ausência de vórtices:

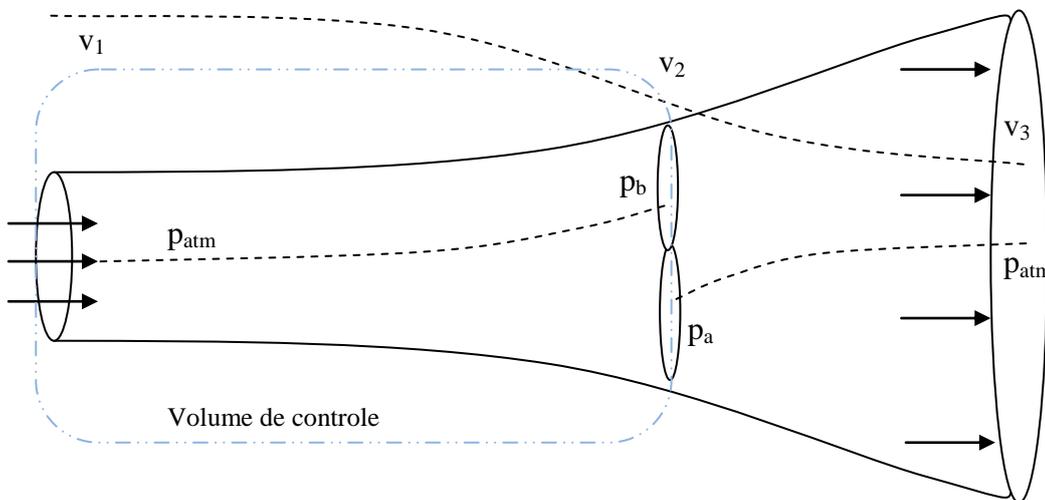


Figura 14: Esquema simplificado do escoamento de ar em uma turbina eólica

A primeira etapa para se avaliar o rendimento máximo da turbina é determinar a velocidade do vento sobre o rotor da turbina, v_2 . Pela equação de conservação de massa:

$$\dot{m} = \rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 = \rho A_3 v_3 \quad (2.4)$$

A força exercida pelo rotor sobre o vento pode ser escrito como:

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} = \dot{m} \cdot \Delta v = \rho A_2 v_2 \cdot (v_1 - v_3) \quad (2.5)$$

A potência associada à força pode ser então obtida por:

$$P = \frac{dE}{dt} = F \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot v_2 \quad (2.6)$$

Onde E é o trabalho realizado pela força F. Substituindo I em II, temos:

$$P = \rho A_2 v_2^2 \cdot (v_1 - v_3) \quad (2.7)$$

A potência pode também ser calculada em termos da energia cinética contida no volume de controle considerado na figura 14:

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} \cdot \rho A_2 v_2 \cdot (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.8)$$

Igualando as expressões 2.7 e 2.8:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho A_2 v_2 \cdot (v_1^2 - v_3^2) = \rho A_2 v_2^2 \cdot (v_1 - v_3) \quad (2.9)$$

Resolvendo-a, obtemos:

$$v_2 = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_3) \quad (2.10)$$

O resultado mostra que podemos considerar que a velocidade no rotor é a média das velocidades v_1 e v_3 ao longe do escoamento. Assumindo então que a velocidade final v_3 é uma fração “f” da inicial ($v_3=f \cdot v_1$), teremos:

$$v_2 = \frac{1}{2} \cdot (v_1 + v_3) = \frac{1}{2} v_1 \cdot (1 + f) \quad (2.11)$$

Aplicando a equação da quantidade de movimento entre 1 e 2, tem-se:

$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_3) = \rho A_2 v_2 \cdot (v_3 - v_1) \quad (2.12)$$

Das equações 2.11 e 2.12, obtemos:

$$F = \rho A_2 \frac{1}{2} v_1^2 \cdot (1 + f) \cdot (1 - f) \quad (2.13)$$

O que corresponde a uma potência de:

$$P = F \cdot v_2 = \underbrace{\rho A_2 \frac{1}{2} v_1^3}_{\text{potência vento}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} (1+f) \cdot (1-f^2)}_{\text{fração extraída} = \eta} \quad (2.14)$$

A fração extraída corresponde ao rendimento do rotor, enquanto que a potência do vento é aquela total que passaria pela área do rotor se não houvesse a turbina e a deformação do fluxo de ar.

Derivando o rendimento em função de f e igualando a zero verifica-se que ela será máxima para $f=1/3$. Substituindo:

$$\eta_{\max} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) \cong 59,3\% \quad (2.15)$$

Isso significa que o máximo rendimento aerodinâmico que se obtém de um gerador eólico é de 59,3%, conhecido como o limite de Betz. Outro resultado notável do desenvolvimento anterior é sobre a velocidade de saída do rotor, que deverá ser um terço daquela de ingresso para que se atinja o máximo rendimento.

2.3.1.3. PRINCÍPIO FÍSICO

A transformação da energia dos ventos em mecânica em um gerador eólico ocorre pelos princípios aerodinâmicos de arraste e de sustentação aos quais as pás da turbina são submetidas.

O princípio de arraste se fundamenta na existência de uma força de resistência que surge quando um corpo é inserido num meio onde há um fluido em movimento, no caso a corrente de ar. O mesmo princípio é verificado no trabalho realizado por um remo para impulsionar uma canoa na água. Supondo remadas perfeitas (sem deslizamento do remo em relação à água) a máxima velocidade que se pode atingir com a canoa é a mesma que a da remada. Quando isso ocorre, dizemos que a velocidade tangencial do rotor é a mesma que a do vento.

O coeficiente de potência do rotor é determinado em função de dois parâmetros importantes: “tip speed ratio” (TSR ou λ) e o ângulo de pitch ou de passo δ da pá.

Por definição, TSR é a relação entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a do vento, dada por: $\frac{\omega R}{V_{vento}}$. O ângulo de passo, por sua vez, é definido como sendo o ângulo entre o plano de rotação e a corda do fólio.

Em uma turbina eólica cujo projeto se baseia na predominância da atuação de forças de arraste TSR é próximo da unidade e, se superior, é porque existem forças de sustentação sendo aplicadas às pás da turbina. As turbinas que funcionam por elevação trabalham com maiores velocidades de rotação e são normalmente mais eficazes que turbinas que funcionam predominantemente por arraste.

Segundo Bernoulli, as forças de arraste (resistência) e de sustentação são proporcionais à força contida nos ventos segundo um coeficiente:

$$F_d = C_d \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (\text{força de arraste}) \quad (2.16)$$

$$F_l = C_l \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (\text{força de sustentação}) \quad (2.17)$$

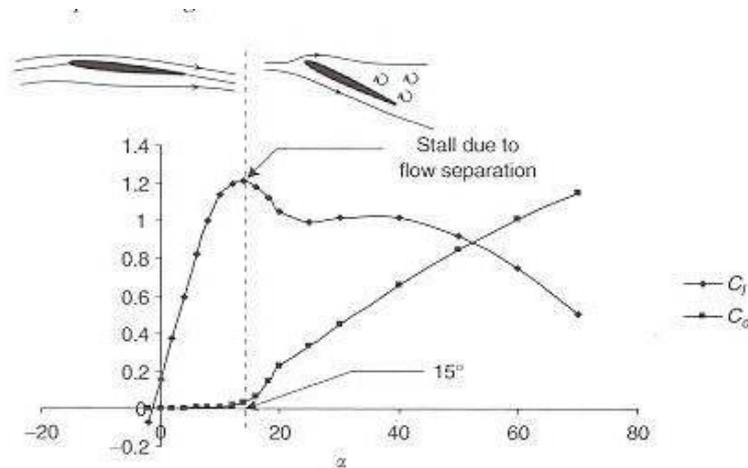


Figura 15. Comportamento típico dos coeficientes de sustentação e de arrasto segundo ângulo de ataque ^[14].

Os dois coeficientes dependem da forma da pá e de sua inclinação em relação ao vento (ângulo de ataque α) e apresentam um comportamento típico àquele representado na figura 15. Com essas expressões, os modelos de pás utilizados e o fluxo de vento aparente que as pás “enxergam”, poder-se-ia calcular o momento que o vento aplica no rotor dada pela integral:

$$M = \int_{r=0}^{r=R} r \cdot F_t(r) \cdot dr \quad (2.18)$$

No entanto, lembrando que em turbinas de eixo horizontal a forma da seção da pá muda ao longo de seu comprimento (já que a velocidade tangencial é crescente com o raio), mudam também os valores de C_r e C_s . Um cálculo mais imediato do momento resultante aplicado sobre o rotor pode ser obtido da própria expressão da potência:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P \cdot R}{v_t} = \eta \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot \frac{R^3}{v_t} \cdot v_v^3 \quad (2.19)$$

Onde v_v é a velocidade do vento, v_t é a velocidade tangencial periférica da pá e R é o raio do rotor.

Para facilitar a visualização das forças atuantes na pá da turbina eólica, a figura 16 apresenta o diagrama de forças existente em uma seção da pá.

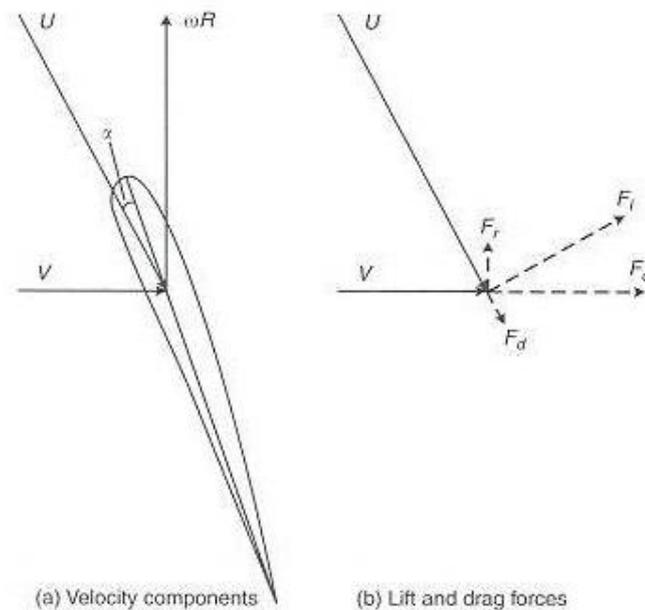


Figura 16. Diagrama de forças na pá da turbina [14].

A força de sustentação possui direção perpendicular à velocidade aparente U com que a pá “enxerga” o vento, que corresponde à soma da velocidade periférica da

seção da pá com a do vento. A força de arraste possui mesma direção e sentido que essa velocidade relativa U.

Considerando um corpo que está submetido somente à força de resistência, a sua potência será dada pelo produto da força de arraste resultante e a velocidade do corpo em movimento (v_c), que possui direção e sentido igual à da força. Assim:

$$P = F_r \cdot v_c = C_r \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho A_c \cdot (v_v - v_c)^2 \cdot v_c \quad (2.20)$$

Baseando na mesma lógica feita para a teoria de Betz, podemos dizer que se $v_c = f \cdot v_v$, a expressão anterior poderia ser reescrita:

$$P = F_r \cdot v_c = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_c \cdot v_v^3}_{\text{potência vento}} \cdot \underbrace{C_r \cdot (1 - f)^2 \cdot f}_{\text{fração extraída}} \quad (2.21)$$

E lembrando o caso em que o rendimento é máximo para $f=1/3$ (Betz), o máximo rendimento que seria obtido de uma turbina funcionando somente com força de arraste, considerando um C_r de 1,35 (valor máximo), seria da ordem de:

$$\eta_{\max(\text{res})} = C_r \cdot \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 \cdot \frac{1}{3} = C_r \cdot \frac{4}{27} \cong 20\% \quad (2.22)$$

Verifica-se que o valor do rendimento obtido para uma turbina que funciona somente com o princípio da resistência é muito inferior àquele máximo teórico obtido pelo princípio de Betz (59%). Conseqüentemente, os investimentos de aerogeradores se concentram muito mais no princípio de sustentação no que aquele de arraste. Além disso, outro fator que se deve considerar para avaliar a eficiência de uma turbina eólica é a tipologia do aerogerador, que pode ser dividido de acordo com a orientação do eixo do rotor.

2.3.2. TIPOS DE AEROGERADORES

Embora sejam diversas as características que distinguem o tipo de turbina eólica, como o número de pás, o princípio físico utilizado e a orientação do eixo do rotor, os aerogeradores são classificados em dois tipos, segundo a direção do eixo de

rotação: rotores de eixo horizontal (HAWT – Horizontal Axis Wind turbine) e rotores de eixo vertical (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine).

As turbinas de eixo horizontal são mais comuns em empreendimentos de grande porte e são largamente utilizados no mundo, devido às altas eficiências que podem atingir. Embora algumas turbinas de eixo horizontal tenham sido projetadas com o princípio de arraste, a sua grande maioria é baseada nos princípios de sustentação.

Os geradores eólicos mais utilizados para geração de energia elétrica na atualidade são os de tripala de eixo horizontal que desfrutam o princípio de sustentação, visualizados na figura 18.



Figura 17: HAWT tripala.

A turbina eólica de eixo vertical, por sua vez, pode ter projeto baseado no princípio de sustentação ou de arraste e possuem duas vantagens principais em relação à tecnologia de eixo horizontal: o gerador pode ser posicionado na base da estrutura e não há a necessidade de um mecanismo de orientação para o vento, tornando-a mais apta para locais onde há variações frequentes na direção do vento. Infelizmente, porém, normalmente apresentam rendimentos inferiores às máquinas com rotor horizontal. A possibilidade de operação para ventos fracos no entanto as tornam muitas vezes atraente para aplicações de pequeno porte.

Um exemplo de sistema eólico com eixo vertical baseado predominantemente em arraste é o rotor Savonius. Com baixa rotação, mas elevado torque, normalmente

é utilizado na moagem de grãos e bombeamento de água. As figuras 19 e 20 representam esse tipo de turbina.



Figura 18: Turbina Savonius

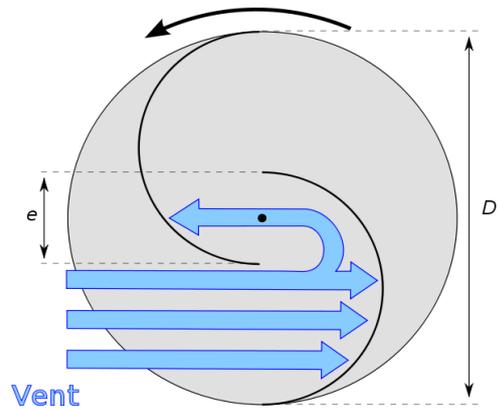


Figura 19: Fluxo de ar na turbina Savonius

Turbinas de eixo vertical que utilizam o princípio de sustentação também foram desenvolvidas, como os aerogeradores Darrieus e do tipo H (cujas pás possuem formato de fólios). O projeto é elaborado de modo que as pás, quando submetidas a uma corrente de ar, exerçam por boa parte da rotação uma força aceleradora. Rotores deste tipo recebem o torque máximo duas vezes por revolução, como se pode verificar na figura 20.

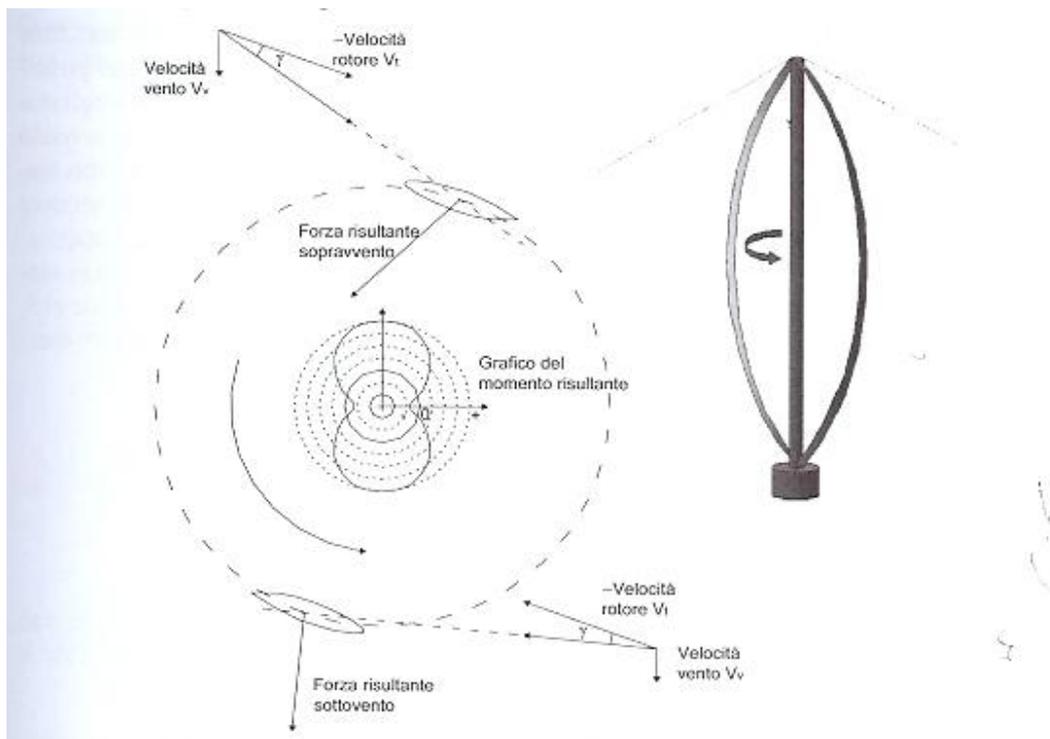


Figura 20: Funcionamento de uma turbina Darrius e a curva polar do momento produzido em função da posição ^[21]

Assume-se que a velocidade absoluta do vento é constante e unidirecional e que a velocidade periférica da pá chega a atingir 3 vezes ou mais a velocidade do vento durante a operação da turbina. Nessa configuração, os fólios “cortam” o ar com um pequeno ângulo de ataque e as forças de sustentação sempre promovem a rotação do rotor, enquanto as forças de arraste sempre se opõem a ela.

Na posição inicial do fólio à direita (0°) e à esquerda (180°), onde a orientação do mesmo é paralela à direção do vento, o torque resultante é negativo devido à força de arraste e à inexistência de sustentação (ângulo de ataque é nulo). Quando o fólio se aproxima das posições de 90° e 270° , a componente da força de sustentação é muito superior que a de arraste e um torque positivo é produzido. O bom funcionamento da turbina Darrius depende, portanto, de uma velocidade periférica ótima e por isso que elas dificilmente partem sozinhas, sendo muitas vezes utilizada uma integração de uma turbina Savonius na sua construção.

Debates até a década de 90 questionavam se o eixo das turbinas eólicas de grande porte deveria ser vertical ou horizontal. Muitas turbinas do tipo Darrius

foram construídas na Califórnia e protótipos no Canadá e Reino Unido. No entanto, verificou-se após estudos e análises que o custo de turbinas deste tipo era mais elevado, levando ao fim para essa linha de desenvolvimento [11]. A figura 22 apresenta diversos tipos de turbina que foram estudadas pelo ser humano, lembrando que um mesmo tipo pode apresentar muitas variações.

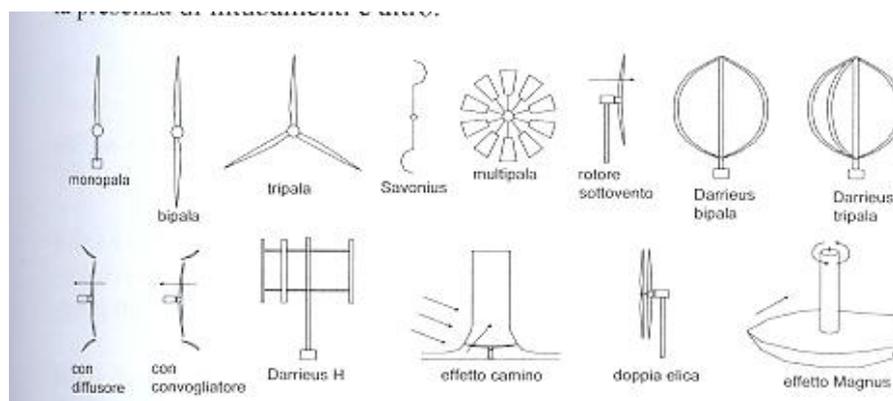


Figura 21: Diversos tipos de forma construtiva de turbina eólica.

2.3.3. COMPONENTES DE UM GERADOR EÓLICO

Um projeto de turbina eólica pode variar e apresentar algumas diferenças quanto à disposição e utilização de alguns equipamentos. Para aerogeradores de pequeno porte, por exemplo, alguns componentes são simplificados ou até mesmo eliminados, devido à desnecessidade e à intenção de minimizar os custos. Um aerogerador com potência nominal de alguns megawatts, por sua vez, apresenta uma grande complexidade e requer um número elevado de componentes e subsistemas, que podem chegar até 8000.

A figura 23 ilustra os componentes e os respectivos custos associados de uma turbina de grande porte, modelo MM92 da Repower. Como o enfoque de estudo deste trabalho é um aerogerador de pequeno porte destinado para o uso residencial, serão descritas a seguir os principais componentes presentes em um projeto básico de aerogerador

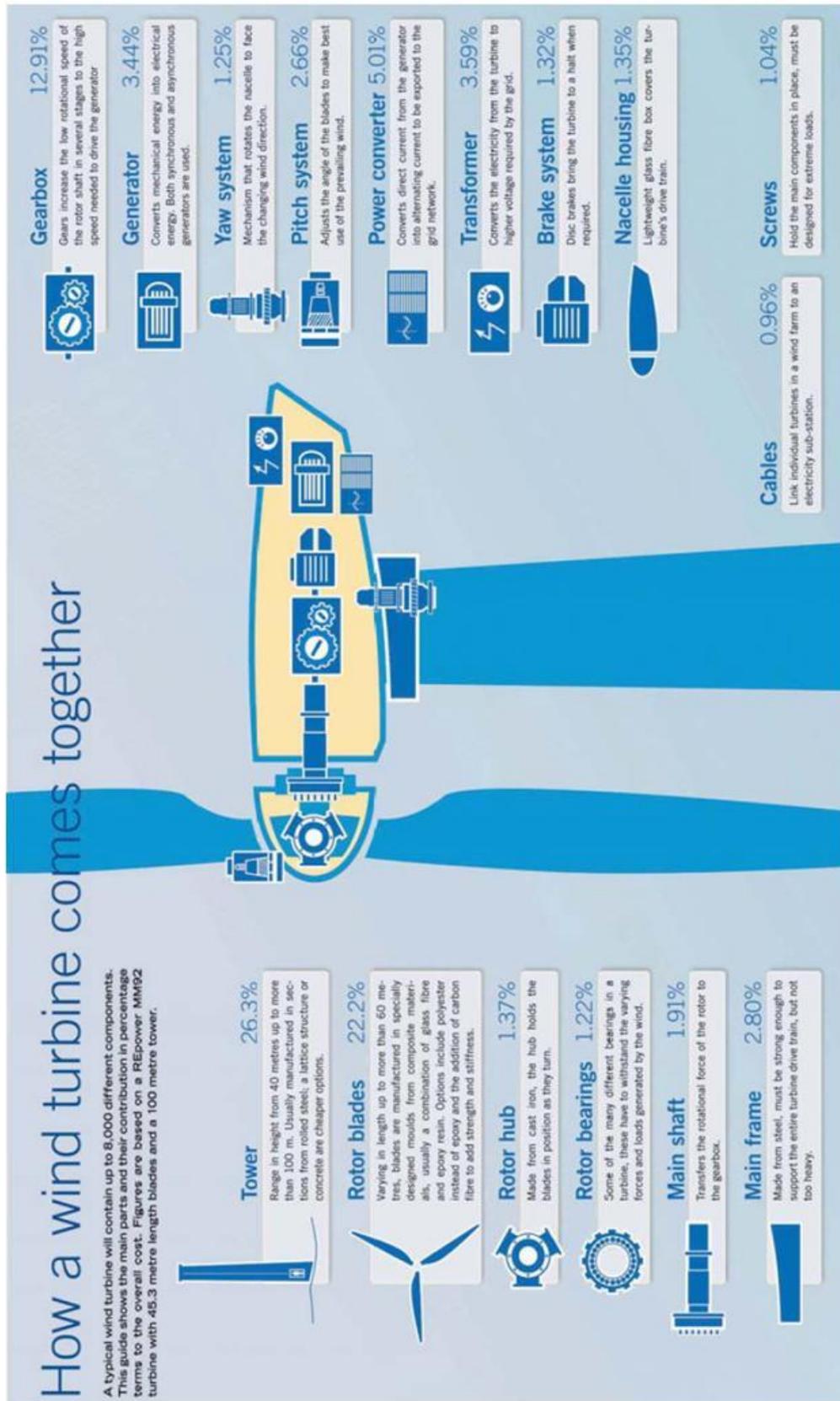


Figura 22: Componentes de uma turbina de eixo horizontal.
 Fonte: Wind Direction Jan-Feb 2007, Merrill Lynch

- Pás,Cubo e Eixo: As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Elas são fixadas ao cubo, estrutura de alta resistência que está ligada ao eixo do rotor, que é o acoplamento entre o gerador e o cubo, responsável pela transferência de energia mecânica da turbina.
- Caixa de transmissão: Converte a velocidade de rotação do rotor (torque elevado e baixo número de giro) para a rotação necessária para funcionamento adequado do gerador, que possuem rotação típica de 1800 rpm (60 Hz). A transmissão mais utilizada é feita por engrenagens. Alguns fabricantes eliminaram o multiplicador de giro do projeto. Neste caso, o gerador é do tipo multipolos e possui uma rotação muito inferior, fato que aumenta a vida útil do equipamento. No entanto, impede a utilização de geradores comerciais de série, que custam muito menos.
- Gerador: Os geradores são responsáveis pela conversão da energia mecânica em elétrica, através do princípio de indução magnética. Podem ser de diversos os tipos de geradores (de corrente contínua, assíncronos e síncronos). Para aplicações isoladas, o gerador mais utilizado é o síncrono, associado a um retificador de corrente para obtenção de corrente contínua. Esse processo possibilita a aplicação de um sistema de armazenamento de baterias. A vantagem da utilização de um gerador do tipo síncrono é que o mesmo permite um intervalo de variação da velocidade de rotação do rotor, uma vantagem no que diz respeito a sistemas eólicos. No caso de um gerador assíncrono, as pás giram sempre com a mesma velocidade independente do vento. Essa velocidade é determinada pela frequência da rede.

Apesar da conversão eletro-mecânica ser um problema tecnologicamente dominado, a integração de geradores no sistema de conversão eólica envolve a problemática da variação da potência de entrada, devido às grandes variações da velocidade do vento.

- Acumulador: O acumulador é um conjunto de baterias que tem a finalidade de promover o equilíbrio entre a demanda energética e a disponibilidade da energia contida nos ventos, de modo que possa armazenar energia elétrica quando a demanda da mesma (determinada pelo usuário) seja inferior àquela que pode ser

gerada com a turbina eólica. As baterias usadas no sistema de energia eólica são do tipo ciclo-longo (baixa frequência de carga-descarga), uma vez que podem ser submetidas a longos ciclos de descarga (calmaria).

- Controle de velocidades: Embora seja uma preocupação típica de grandes turbinas eólicas e não fazerem parte do escopo de estudo de aerogeradores de pequeno porte, o controle de velocidade do rotor é um importante sistema de segurança no projeto de um aerogerador. Para velocidades muito elevadas, o gerador pode sofrer sobreaquecimento e danificações estruturais. Desta forma, sistemas de controle atuam no ângulo de passo das pás para alterar o ângulo de ataque das mesmas e alterar os efeitos aerodinâmicos presentes (força de sustentação e arraste) e, conseqüentemente, o torque resultante. Outra forma de controle seria aquela cuja potência extrída é regulada pelo efeito “stall”. Neste caso, a pá não possui rotação em seu próprio eixo, mas seu perfil é projetado de modo que a partir de uma determinada intensidade de vento uma parte crescente da pá esteja em “stall”, reduzindo sua eficiência e o torque transmitido. Uma outra solução possível é a utilização de freios para o controle da velocidade do eixo.
- Torre: É a estrutura que sustenta e posiciona o rotor a uma altura conveniente para seu funcionamento e possui grande contribuição no custo total do sistema. Recentemente, com o uso de potências cada vez maiores e pesos mais elevados a serem suportados, são feitas torres de concreto ou metal tubular, que podem ser sustentadas ou não por cabos tensores. Para turbinas de pequeno porte, as estruturas podem ser do tipo treliçada.
- Acessórios: São equipamentos que podem ser empregados dependendo do tipo de aplicação que o aerogerador será utilizado. Entre eles, podemos citar o retificador de corrente (transforma corrente alternada para corrente contínua), inversor (papel inverso do retificador), controlador de carga (evitar danos à bateria devido à sobrecarga ou descarga profunda), fusíveis e disjuntores.

2.3.4. ANÁLISE DO RENDIMENTO DE UM AEROGERADOR

Introduzidos os parâmetros que se relacionam com o rendimento de um aerogerador e os tipos de turbinas disponíveis na atualidade, podemos visualizar de maneira generalizada na figura 24 como é o comportamento do coeficiente de potência de acordo com o tipo de gerador e λ (TSR).

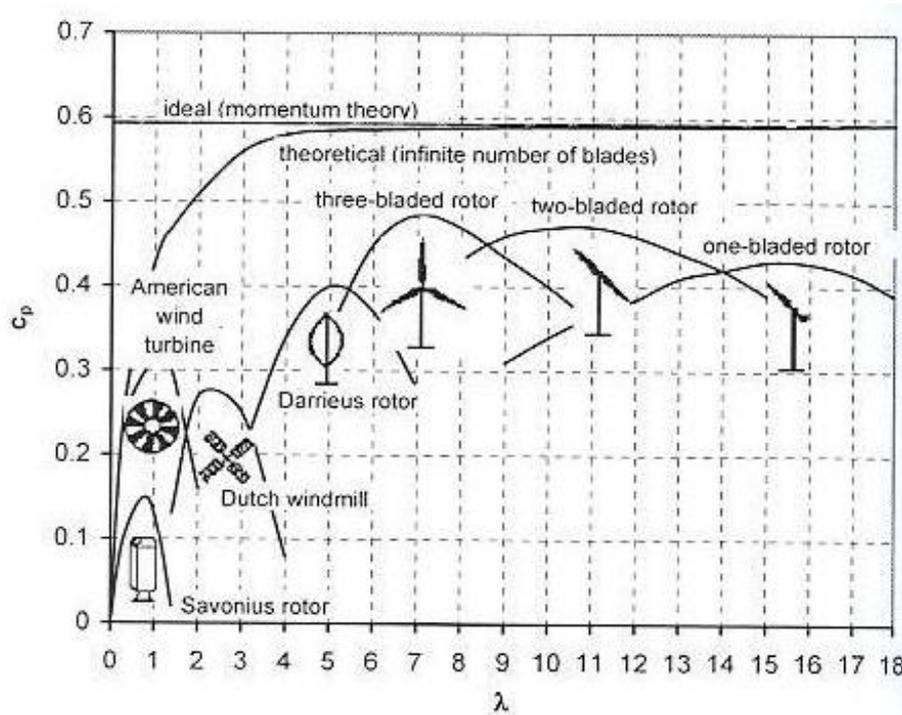


Figura 23: Dependência do coeficiente de potência com λ para diversos tipos de turbina^[11]

Vale destacar também a importância da dependência de C_p com o ângulo de passo da pá (δ), uma vez que esta determina os ângulos de ataque que, por sua vez, determinam os coeficientes de sustentação e de arraste aos quais a pá está submetida.

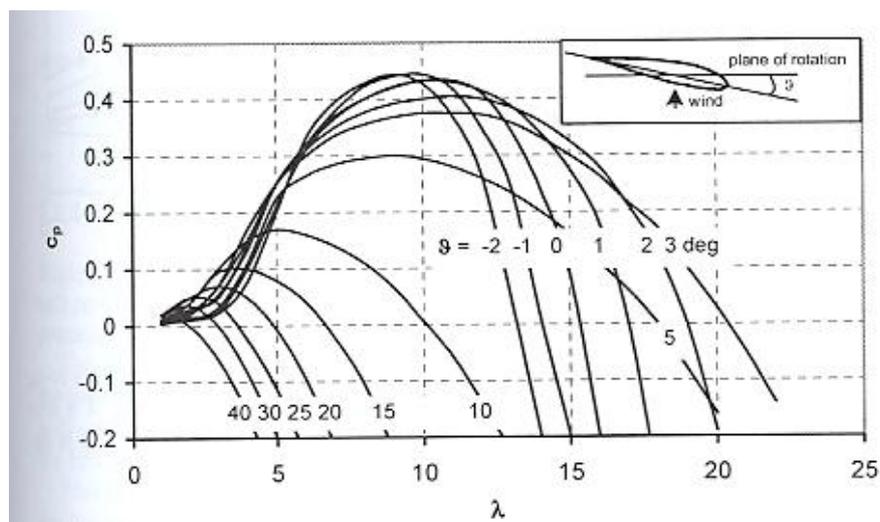


Figura 24: Dependência de C_p com o ângulo de passo (δ) para uma mesma turbina^[11].

O valor de C_p para uma turbina de eixo horizontal está normalmente compreendido entre 0,4 e 0,5 (quando muito eficientes) e, para turbinas de eixo vertical, o exato valor de C_p é ainda difícil de ser definido, dado que poucas turbinas deste tipo estão em operação. Conseqüentemente, valores de C_p para VAWTs são baseados em estudos teóricos e ainda merecem muitas pesquisas. No entanto, resultados experimentais chegaram a confirmar coeficientes de potência da ordem de 0,4 para uma turbina do tipo H e Darrieus^[12].

Enquanto que a tecnologia de turbinas de eixo horizontal esteja bastante consolidada para instalações de potência elevada, estudos mostram que o uso de turbinas de eixo vertical apresenta grande potencial para instalações de pequeno porte, em áreas montanhosas, regiões com ventos muito intensos e rajados, ou em áreas urbanas^[13].

Como exemplo de comparação, a figura 26 a seguir apresenta o comportamento do coeficiente de potência para três tipos de turbina: um rotor do tipo H de duas pás (British VAWT 260, de 100 KW de potência)^[8], um rotor do tipo Darrieus (Sandia-34, de 500 KW de potência)^[9] e um rotor HAWT, cujos dados foram obtidos do Laboratório Nacional de Energia Renovável e que representam o funcionamento de um típico HAWT^[10].

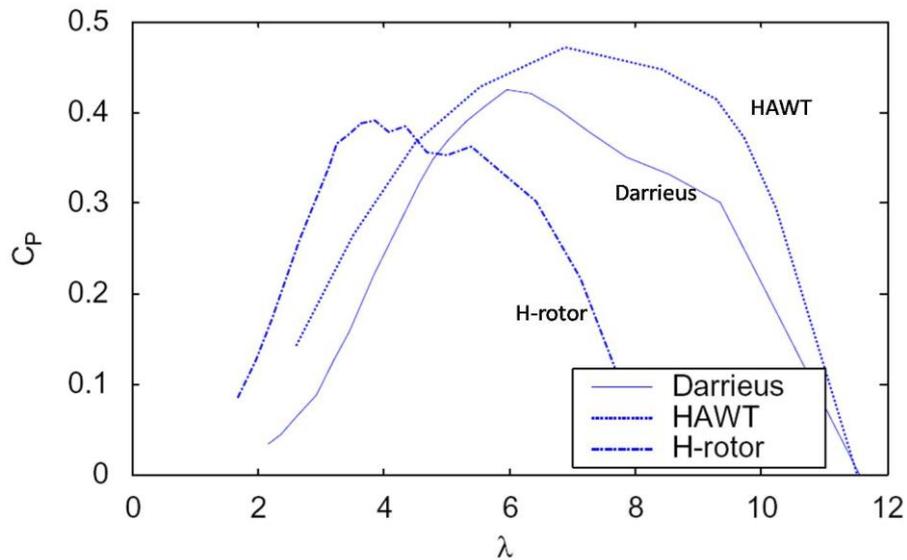


Figura 25: Curvas de C_p para diferentes tipos de turbina. Fonte: Science Direct

Em conversa com a professora Eliane Fadigas, do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica (PEA) da Escola Politécnica da USP, o desempenho de uma turbina eólica de eixo horizontal está intimamente ligado ao desempenho aerodinâmico da mesma, ou seja, ao projeto das pás. Desta maneira, embora sempre presente as perdas de rendimento associadas aos diversos equipamentos mecânicos (como a caixa de engrenagem) e eletro-eletrônicos, o projeto aerodinâmico das pás responde pela maior parte da eficiência de uma turbina. Outro fator que é primordial para a potência extraída dos ventos é o local de sua instalação. Como exemplo, a turbina instalada na USP no ano de 2009 para estudo de um controlador de carga, próximo ao Portão 3, possui potência nominal de 1 KW. Este valor foi atingido poucas vezes desde o início de seu funcionamento. Segundo Eliane, a potência atingida variava entre 100 e 300 W.

Quando a instalação de pequenos geradores eólicos visa o abastecimento de baterias, é mais comum o uso de geradores síncronos de ímãs permanentes, como já mencionado no item 2.3.3. Um grande problema no projeto de uma pequena turbina eólica é a integração entre a curva de potência que a turbina fornece e aquela do gerador. São componentes que devem ser “dimensionados” juntamente, para que o conjunto/sistema apresente melhores performances. Uma má escolha de gerador, mesmo que a turbina forneça potências significativas, pode levar a resultados de geração de energia insatisfatórios, conforme referência [15].

Por experiência, ventos sul apresentam uma maior constância e são mais frequentes e variam normalmente entre 7 e 15 nós (3,8 a 8,1 m/s). Ventos noroeste, por sua vez, são mais rajados e possuem uma intensidade um pouco maior que o vento sul, apresentando uma faixa de variação de 8 a 17 nós (4,3 a 9,2 m/s).

Desta maneira, adotar-se-á uma intensidade média de vento de 5 m/s (9 nós) para se estudar o desempenho teórico dos protótipos.

3.2. IDEALIZAÇÃO DO PROTÓTIPO

Ao contrário da escolha de equipamentos para satisfazer um projeto mecânico, que são determinados de acordo com a necessidade que têm de atender, a idealização dos protótipos eólicos a serem fabricados ficaram limitados às dimensões de seus componentes, já que a intenção deste trabalho era a construção de um modelo através de recursos e investimentos limitados, embasando-se na questão do uso de materiais reaproveitáveis e na sustentabilidade. Desta forma, os protótipos não visam em si atender uma necessidade pré-determinada, mas sim de fornecer dados quanto sua aplicabilidade com os recursos disponíveis a nossa volta. No caso de se almejar uma maior captação de energia, isso poderia ser possível através da utilização de uma maior quantidade de turbinas deste tipo. Isso é uma consideração importante, ressaltando-se o fato de que o uso de turbinas de pequeno porte não está restringido a aplicações de baixa demanda energética.

O estudo visa à implantação de três diferentes tipos de turbina e, nesse sentido, procurou-se idealizar um modelo comum que fosse capaz de acomodar essas diferentes configurações. Foram feitas pesquisas bibliográficas de artigos, textos e de servidores de vídeos públicos da internet, chegando-se a um modelo de estrutura que atendesse esse requisito e com relativa facilidade construtiva.

A idéia foi criar uma estrutura de base, feita de madeira peroba devido à disponibilidade do material e escolhida a critério do autor (uma escolha por outro tipo de material, como aço carbono ASTM A53, também poderia ser uma opção), que suportasse um eixo através de dois mancais. O único movimento livre para o eixo seria o de rotação.

As pás da turbina seriam arranjadas entre os dois mancais, com o auxílio de rodas de bicicleta reaproveitadas: no caso do cata-vento, apenas uma roda seria utilizada, enquanto que nas outras duas turbinas (de eixo vertical), seriam necessárias duas rodas para a fixação das “pás” (vide figura 28 e 29).

As rodas possuem um diâmetro de 60 cm, limitando a área de rotor da turbina de eixo horizontal a uma dimensão um pouco maior que esta. Desta forma, foi adotada uma área de varredura semelhante para os outros dois tipos de turbina (eixo vertical), de modo que uma análise comparativa futura da potência mecânica extraída pelas turbinas estivesse condicionada aos mesmos parâmetros. No caso das turbinas de eixo vertical, a área a ser considerada é um retângulo que possui como dimensões o diâmetro da roda e a distância entre elas. A distância entre rodas adotada foi 50 cm, pois:

$$A_{\text{catavento}} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cong \frac{\pi \cdot 0,60^2}{4} = 0,28m^2 \quad (3.1)$$

$$A_{\text{VAWT}} = d \cdot L \cong 0,60 \cdot 0,50 \cong 0,3m^2 \quad (3.2)$$

Na realidade as áreas efetivas possuem dimensões um pouco maiores que as descritas acima, uma vez que as pás, tanto nas turbinas de eixo horizontal como vertical, superam um pouco as dimensões da roda e da distância entre elas.

A fixação das rodas no eixo deve ser simples, uma vez que estaria sujeita a modificações e manuseio constante. Uma solução simples e satisfatória encontrada para atender este requisito foi utilizar uma barra roscada de aço carbono ASTM A53 de 13 mm de diâmetro e de 1 m de comprimento, encontrado facilmente em qualquer loja de materiais de construção.

Esse eixo foi usinado em suas extremidades para um diâmetro de 10 mm para a inserção de rolamentos do tipo rígido de esferas de uma carreira, com vedantes de contato em ambos os lados, modelo SKF61800-2RS1 (vide figura 27). Segundo dados do fabricante, a carga axial limite para este tipo de rolamento deve ser inferior a 25% da carga estática C_0 , que no caso é de 0,585 kN^[19]. Significa que a carga axial não deve ser superior a 146,25 N.

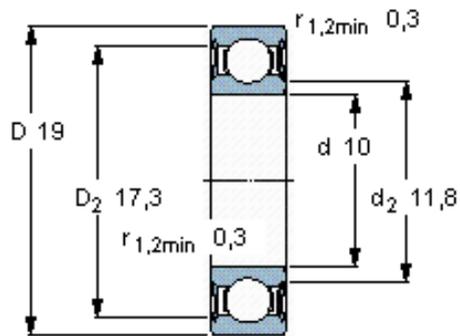


Figura 27: Rolamento SKF 61800-2RS1

Os modelos de estrutura podem ser visualizados a seguir:

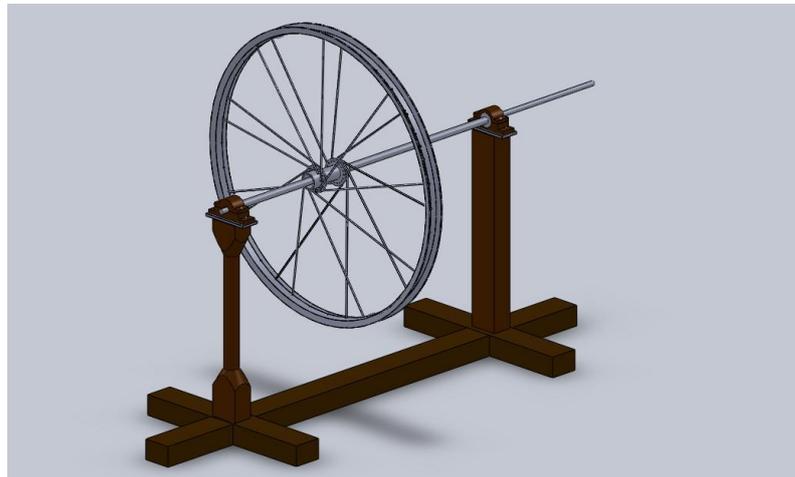


Figura 28: Estrutura utilizada para turbina de eixo horizontal



Figura 29: Estrutura utilizada para as turbinas de eixo vertical.

3.3. ESTUDO TEÓRICO E MODELOS MATEMÁTICOS

3.3.1. HAWT – “CATAVENTO”

O torque em uma turbina eólica surge a partir das forças tangenciais ao movimento rotativo do rotor, que por sua vez são resultantes da decomposição das forças de sustentação e de arraste às quais a pá está submetida. Essas últimas dependem do ângulo de ataque que, no caso de uma turbina de eixo horizontal, depende da velocidade periférica das pás. Surge, portanto, a necessidade de que cada seção possua um ângulo de ataque para otimizar as forças aerodinâmicas presentes na mesma.

A torção das pás pode ser projetada levando-se em conta 4 aspectos:

- Tipo de aerofólio utilizado;
- Ângulo de ataque desejado;
- Rotação desejada;
- Velocidade do vento incidente.

Conhecendo-se a curva de desempenho do aerofólio utilizado, determina-se um ângulo de operação (de modo a se obter um maior coeficiente de sustentação). Através da rotação da turbina e da velocidade do vento incidente, determina-se o vetor da velocidade do vento relativo. Com estes desses parâmetros, determina-se por fim a torção da pá naquela seção.

No entanto, como prever o vento, ou como atingir uma rotação do rotor desejada e ótima? Na construção de grandes turbinas eólicas, esta questão foi solucionada com a tecnologia investida nos equipamentos, possibilitando sistemas integrados de controle e variação do ângulo de passo das pás da turbina. Apesar de não ser impossível a utilização destes sistemas em geradores eólicos de pequeno porte, seu uso é praticamente utópico, quando a intenção é desenvolver um produto de pequena capacidade de geração de energia.

Ainda que baseada em hipóteses é interessante realizar uma simulação do comportamento da turbina quando em funcionamento, para se ter uma noção da torção das pás ao longo da direção radial.

As pás utilizadas neste protótipo não possuem um formato conhecido e, portanto, desconhecem-se os coeficientes de sustentação e de arraste que caracterizam a curva de desempenho da mesma. Os valores de C_l e C_d foram escolhidos de forma aproximada e com base em outros estudos ^[20].

Para se estimar uma velocidade de rotação da turbina, foi feito um teste preliminar com o protótipo para se verificar a rotação que se poderia atingir sem nenhuma carga. Foi atingida uma velocidade angular de aproximadamente 3 rps do rotor para um vento de aproximadamente 5 m/s.

Para se estudar a potência teórica que a turbina pode oferecer, considerou-se uma velocidade angular de 2 rps para um vento de 5 m/s, supondo que seria nessas condições o funcionamento da turbina realizando trabalho. Considerou-se também que o vento possui sempre direção paralela ao eixo de rotação, como ilustram as figuras 30.

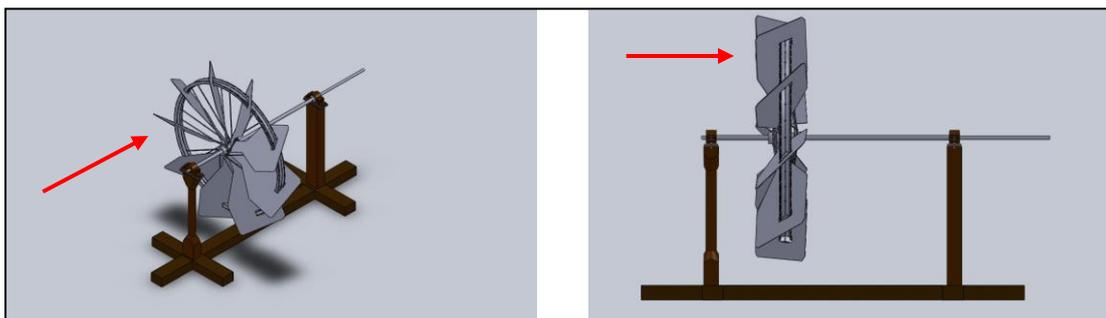


Figura 30: Direção do vento local

Os cálculos para prever a torção das pás são relativamente simples, uma vez que a velocidade aparente que cada pá enxerga é a mesma, o que não ocorre para o caso das turbinas de eixo vertical.

Outros experimentos com esse tipo de turbina e desse porte utilizaram um ângulo de ataque constante igual a 7° ^[20]. Será adotada a mesma configuração para efeito de cálculo, o que significa que a torção da pá deve ser feita de modo a atingir esse ângulo de ataque para cada seção transversal.

A representação vetorial das forças atuantes e dos ventos incidentes está ilustrado na figura 30:

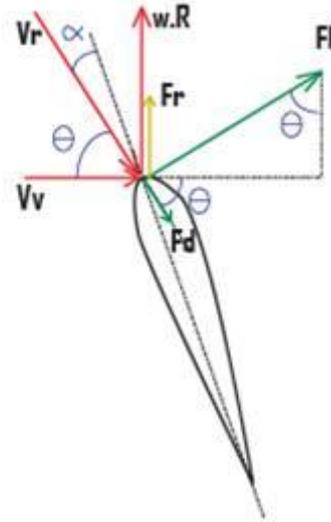


Figura 31: Geometria dos vetores que atuam numa seção da pá

Onde:

α : ângulo entre pá (corda) e o fluxo de ar;

θ : ângulo entre a velocidade aparente e a velocidade do vento;

V_r : velocidade aparente (“resultante”);

V_v : velocidade do vento.

Quando a turbina está girando, a pá “enxerga” a velocidade aparente, que é a soma vetorial das velocidades do vento e de rotação ($w.R$) do rotor.

$$\bullet V_{aparente} = \sqrt{(w.R)^2 + V_{vento}^2} \quad (3.3)$$

$$\bullet \text{Direção de } V_{aparente} = \theta = \arctan\left(\frac{w.R}{V_{vento}}\right) \quad (3.4)$$

A força resultante na direção radial é dada por:

$$\bullet F_R = F_L \cdot \cos(\theta) - F_D \cdot \sin(\theta) \quad (3.5)$$

A torção da pá, em relação à direção da velocidade do vento, é calculada adicionando 7° ao ângulo θ .

Os cálculos das forças também foram simulados aproximadamente, considerando uma área crescente devido ao formato triangular da pá. Até o raio de 10 cm as forças foram desconsideradas porque as pás não partem do eixo de rotação. O torque em cada seção é obtido multiplicando a força resultante pelo raio (braço), fornecendo-nos o torque resultante em cada pá.

Os dados obtidos estão representados na tabela 2.

DADOS											
rotação	2	rps	12,56637061								rad/s
v vento	5	m/s									
Cl	1,1										
Cd	0,05										
ρ_{ar}	1,2	kg/m ²									
qtd. Pás	9										

Raio (m)	Vel radial (m/s)	Vel aparente (m/s)	Direção Vel aparente (graus)	Torção da pá (+7 graus)	Area (m2)	Lift (N)	Drag (N)	Resultante (N)	Torque (N.m)
0	0,00	5,00	0,00	7,00	0	0	0	0,00	0,000
0,05	0,63	5,04	7,16	14,16	0	0	0	0,00	0,000
0,1	1,26	5,16	14,11	21,11	0,001	0,018	0,001	0,02	0,002
0,15	1,88	5,34	20,66	27,66	0,002	0,038	0,002	0,03	0,005
0,2	2,51	5,60	26,69	33,69	0,002	0,041	0,002	0,04	0,007
0,25	3,14	5,91	32,14	39,14	0,002	0,046	0,002	0,04	0,009
0,3	3,77	6,26	37,02	44,02	0,003	0,078	0,004	0,06	0,018
0,35	4,40	6,66	41,34	48,34	0,004	0,117	0,005	0,08	0,030
0,4	5,03	7,09	45,15	52,15	0,005	0,166	0,008	0,11	0,045
									0,116

Torque no cubo (9 pás)	1,04	N.m	(torque total em uma pá)
Potencia real	13,09	W	
Potencia máxima ideal	37,68	W	
Limite Betz (59%)	22,23		
Cp	0,35		

Tabela 2: Estimativa da eficiência de uma turbina de eixo horizontal do tipo cata-vento

Observa-se que, para esta configuração, a turbina possui um coeficiente de potência teórico de aproximadamente 35%. Para uma turbina feita com poucos recursos, é um valor consideravelmente alto, mesmo que a potência gerada seja pequena. Essa é uma análise matemática ainda simples sobre o funcionamento da turbina, uma vez que muitas outras considerações quanto à dinâmica do escoamento poderiam ser consideradas, mas que fogem do escopo deste trabalho. Análises empíricas serão realizadas para verificar a veracidade dos números obtidos com o modelo matemático.

3.3.2. VAWT – ROTOR DO TIPO H (fólios)

Este tipo de turbina possui uma maior complexidade, seja no modelo matemático, seja na fabricação dos seus componentes. Diferentemente de uma turbina do tipo horizontal, a cada posição que a pá (fólio) se encontra, a mesma enxerga a chegada do vento de uma maneira diferente. Além disso, a fabricação dos fólhos é mais complexa, que no caso foram feitas a base de fibra de vidro e resina. Um esquema ilustrativo pode ser visualizado na figura 32.

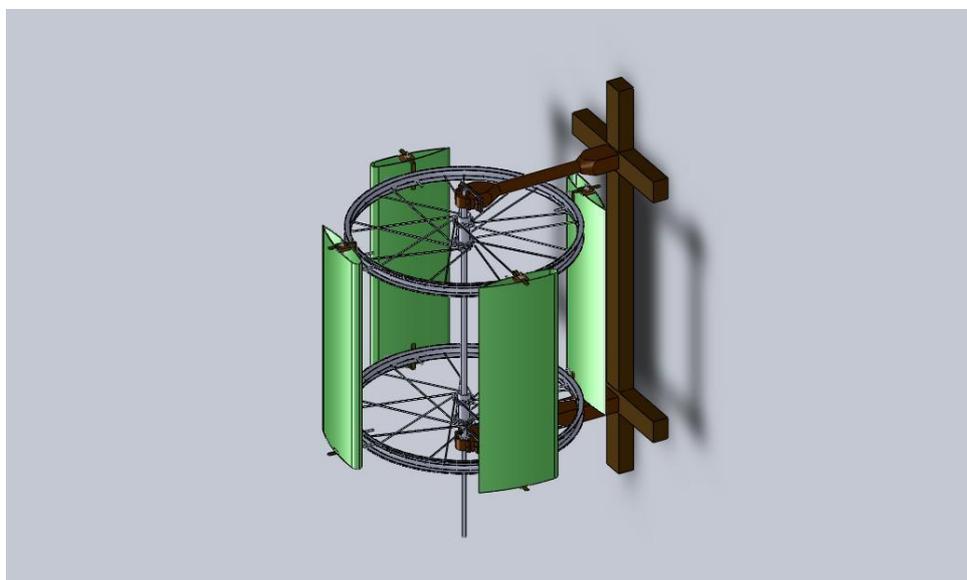


Figura 32. Esquema ilustrativo da turbina de rotor do tipo H (fólios)

Uma escolha decente do tipo de fólio é também importante, de modo que a turbina ofereça uma eficiência maior para uma determinada faixa de vento a qual é submetida. A análise de escoamento em torno de fólhos é um estudo já bem sólido e se aprofundar nesse campo não é intenção deste trabalho. Sendo o protótipo um modelo que ainda merece refinação, o perfil foi escolhido mais para verificar o sucesso do funcionamento do que o rendimento propriamente dito.

O perfil deve oferecer sustentação independente da direção do vento e, estando os fólhos submetidos a um movimento rotacional, o vento ora atinge seus dorsos, ora a parte ventral. Por esse motivo, o fólio também deve apresentar simetria. O fólio

escolhido foi um NACA 0017, cujo corte transversal pode ser visualizado na figura 33.

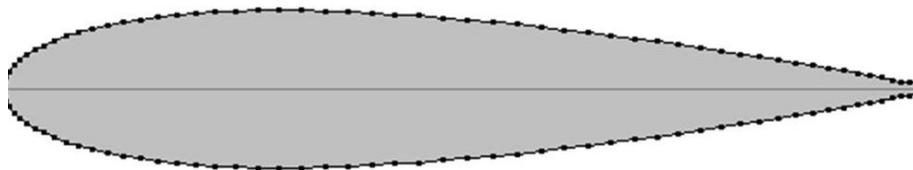


Figura 33: Perfil de um NACA0017

Embora outros perfis possam ser mais eficientes para este tipo de aplicação, um estudo sobre isso poderia complementar e dar continuidade a este trabalho, realizando-se testes para diferentes perfis de fólios.

Para uma simulação hipotética, foi considerado um vento incidente de 5m/s e que a velocidade de rotação da turbina seja de 1 rps. Experiências de teste com a turbina de eixo horizontal criou uma base para essa suposição. O ângulo de inclinação, a princípio, é nulo.

O objetivo é estudar as influências externas às quais o fólio está submetido a cada posição que se encontra ao longo ao longo da sua trajetória. A figura 34 ilustra um esquema para melhor compreensão dos cálculos envolvidos.

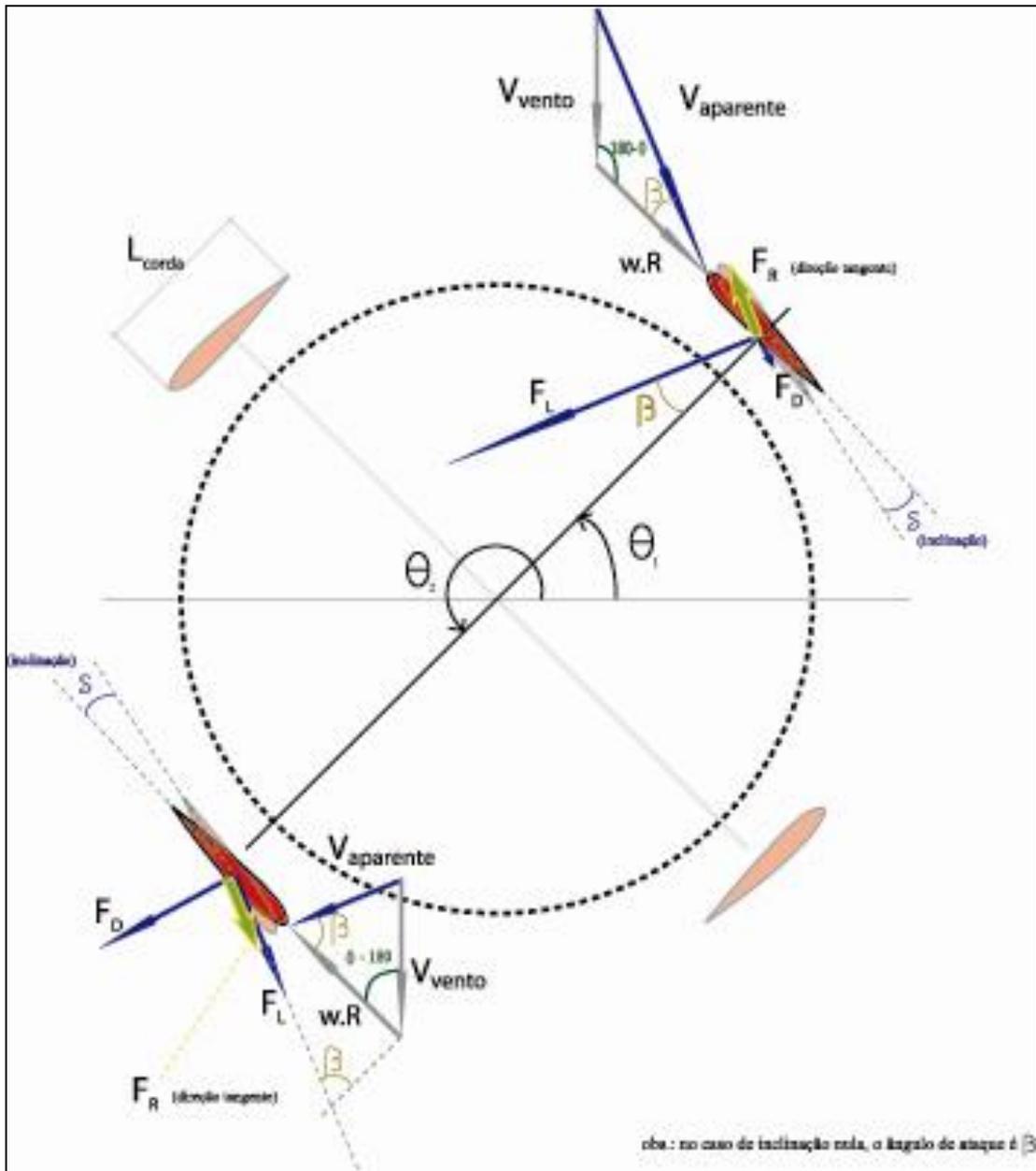


Figura 34. Estudo geométrico sobre os fólhos de uma VAWT

As equações consideradas estão descritas a seguir:

1) Velocidade relativa ou aparente (em módulo) – lei dos cossenos:

$$V_{aparente} = \sqrt{(w.R)^2 + V_{vento}^2 - 2.(w.R).V_{vento}.\cos(180 - \theta)} \quad (3.6)$$

(a equação é igual para qualquer posição, pois $\cos[180-x]=\cos[x-180]$)

2) Ângulo β – lei dos cossenos:

$$\beta = \arccos \frac{(w.R)^2 + V_{aparente}^2 - V_{vento}^2}{2.(w.R).(V_{aparente}^2)} \quad (3.7)$$

3) Ângulo de ataque:

- 1º e 2º Quadrantes $\alpha = |\beta - \delta|$ (3.8)

- 3º e 4º Quadrantes $\alpha = |\beta + \delta|$ (3.9)

4) Direção (e sentido) de $V_{aparente}$:

- 1º e 2º Quadrantes $\xi = \theta - \beta - 90^\circ$ (3.10)

- 3º e 4º Quadrantes $\xi = \theta + \beta - 90^\circ$ (3.11)

5) Área:

$$A = L_{corda} \cdot L_{envergadura} \quad (3.12)$$

6) Forças aerodinâmicas:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \text{ (força de arraste)} \quad (3.13)$$

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \text{ (força de sustentação)} \quad (3.14)$$

Os coeficientes dependem do aerofólio utilizado, do ângulo de ataque e das condições do fluido e podem ser obtidos consultando um catálogo. No caso foram coletados os coeficientes C_l e C_d para o aerofólio NACA0012 para um escoamento com número de Reynolds de 160000, já que não foram encontrados para o NACA0017. Mesmo que não represente uma simulação muito próxima da condição real do experimento, o objetivo é poder avaliar teoricamente o torque sobre o fólio ao longo da rotação, supondo conhecidos os coeficientes de sustentação e de arraste. Os

dados utilizados podem ser visualizados nas figuras 35 e 36, ressaltando que os valores se repetem para ângulos maiores do que 180, dado que o fôlio é simétrico.

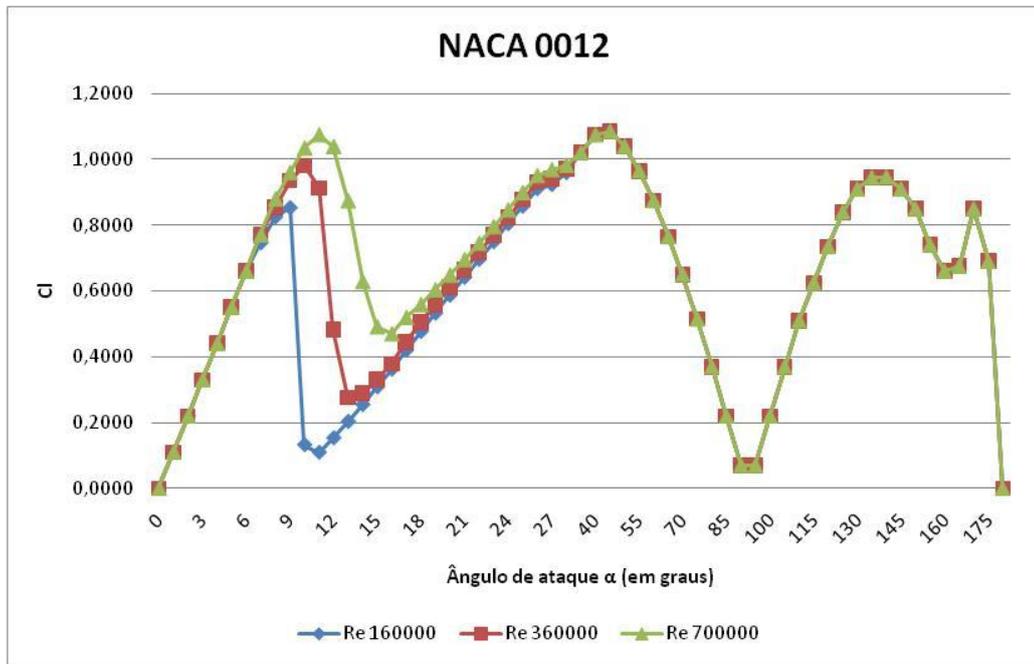


Figura 35. Coeficiente de sustentação em função do ângulo de ataque ^[16]

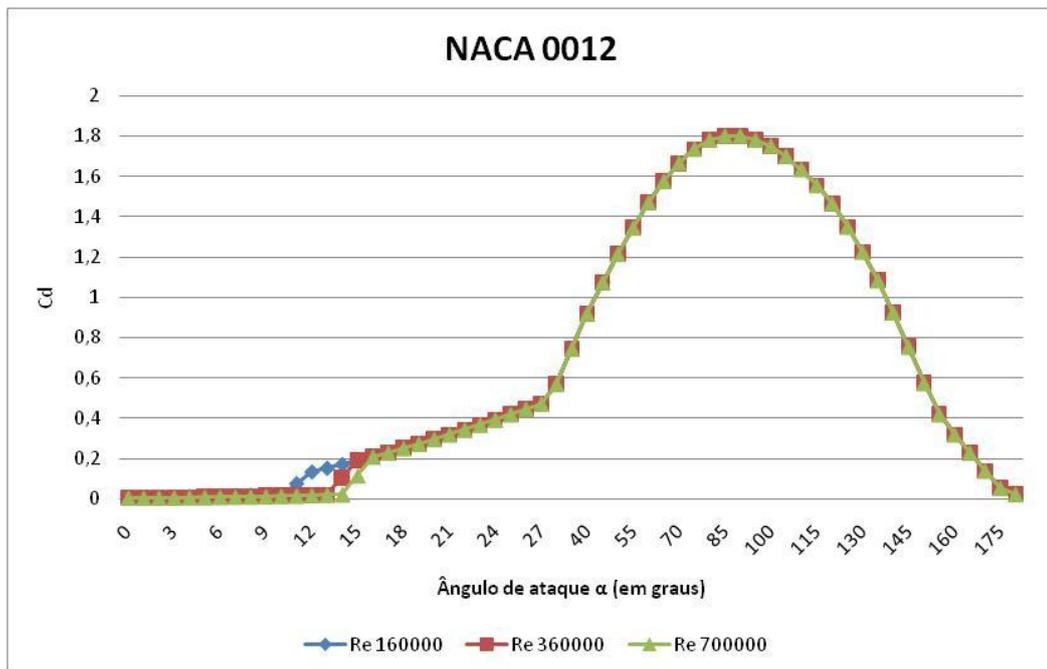


Figura 36 Coeficiente de arraste em função do ângulo de ataque ^[16]

7) Força resultante na direção tangente:

$$F_R = F_L \cdot \text{sen}(\beta) - F_D \cdot \text{cos}(\beta) \quad (3.15)$$

8) Torque resultante:

$$T = F_R \cdot R \quad (3.16)$$

Com estes cálculos, obtém-se o torque médio de um fólio para uma rotação, que por sua vez nos permite calcular o torque médio resultante da turbina, bastando multiplicar o valor do torque médio pelo número de fólhos. A potência é então obtida pela expressão:

9) Potência mecânica total:

$$P_{mecfinal} = \bar{T}_{folho} \cdot \omega \cdot n \quad (3.17)$$

- n corresponde o número de pás utilizado.

A potência máxima ideal pode ser calculada pela expressão já demonstrada na seção 2.3, dada por:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \frac{dL}{dt} \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \quad (3.18)$$

A tabela 8 explicita os valores considerados e resultados obtidos para este estudo teórico:

DADOS

densidade do ar	1,2 kg/m ³
Velocidade do vento	5 m/s
Velocidade periférica	2,2 m/s
Raio	0,35 m
Rotação (veloc angular)	6,285714 rad/s
Cl (máximo)	1,2
Cd	0,01
Inclinação (ângulo entre tang e corda)	0,00 rad
Compr. Corda	0,2 m
Comprimento do fólio (envergadura)	0,59 m
Espessura	0,035 m
Area "frontal" (espessura x compr. Fólio)	0,02065 m

(sentido horário: "+")

posicao	θ (graus)	θ (rad)	V_{apar} (m/s)	β (rad)	β (graus)	$ \alpha $ (rad)	α (graus)	ξ (V_{apar}) (graus)	direcao Lift (graus)	Cl	Cd	Área (m ²)	Lift (N)	Drag (N)	Resultante (N)	Torque (N.m)	
0	0	0	0,0	7,2	0,00	0,0	0,00	0	270	180	0,000	0,010	0,118	0,00	0,04	-0,04	-0,01
1	30	0,52	0,5	7,0	0,37	20,9	0,37	20	279	189	0,587	0,297	0,118	2,03	1,03	-0,23	-0,08
2	60	1,05	1,0	6,4	0,74	42,7	0,74	42	287	197	1,075	0,920	0,118	3,11	2,66	0,15	0,05
3	90	1,57	1,6	5,5	1,16	66,3	1,16	66	294	204	0,765	1,575	0,118	1,62	3,33	0,14	0,05
3.1	115	2,0	2,0	4,5	1,55	88,9	1,55	88	296	206	0,220	1,800	0,118	0,32	2,62	0,27	0,09
3.2	110	1,9	1,9	4,7	1,47	84,0	1,47	84	296	206	0,370	1,780	0,118	0,58	2,81	0,29	0,10
3.3	105	1,8	1,8	4,9	1,39	79,4	1,39	79	296	206	0,515	1,735	0,118	0,88	2,97	0,32	0,11
3.4	100	1,7	1,7	5,1	1,31	74,9	1,31	74	295	205	0,650	1,665	0,118	1,20	3,07	0,36	0,12
4	120	2,1	2,1	4,3	1,64	94,0	1,64	93	296	206	0,070	1,800	0,118	0,09	2,40	0,26	0,09
5	150	2,6	2,6	3,3	2,28	130,4	2,28	130	290	200	0,910	1,225	0,118	0,70	0,94	1,14	0,40
6	180	3,1	3,1	2,8	3,14	180,0	3,14	180	270	180	0,000	0,025	0,118	0,00	0,01	0,01	0,00
7	210	3,7	3,7	3,3	2,28	130,4	2,28	130	250	340	0,910	1,225	0,118	0,70	0,94	1,14	0,40
8	240	4,2	4,2	4,3	1,64	94,0	1,64	93	244	334	0,070	1,800	0,118	0,09	2,40	0,26	0,09
8.1	245	4,3	4,3	4,5	1,55	88,9	1,55	88	244	334	0,220	1,800	0,118	0,32	2,62	0,27	0,09
8.2	250	4,4	4,4	4,7	1,47	84,0	1,47	84	244	334	0,370	1,780	0,118	0,58	2,81	0,29	0,10
8.3	255	4,5	4,5	4,9	1,39	79,4	1,39	79	244	334	0,515	1,735	0,118	0,88	2,97	0,32	0,11
8.4	260	4,5	4,5	5,1	1,31	74,9	1,31	74	245	335	0,650	1,665	0,118	1,20	3,07	0,36	0,12
8.5	265	4,6	4,6	5,3	1,23	70,5	1,23	70	245	335	0,650	1,665	0,118	1,28	3,29	0,11	0,04
9	270	4,7	4,7	5,5	1,16	66,3	1,16	66	246	336	0,765	1,575	0,118	1,62	3,33	0,14	0,05
9.1	285	5,0	5,0	6,0	0,94	54,1	0,94	54	249	339	1,040	1,215	0,118	2,62	3,06	0,33	0,11
10	300	5,2	5,2	6,4	0,74	42,7	0,74	42	253	343	1,075	0,920	0,118	3,11	2,66	0,15	0,05
11	330	5,8	5,8	7,0	0,37	20,9	0,37	20	261	351	0,587	0,297	0,118	2,03	1,03	-0,23	-0,08
12	360	6,3	6,3	7,2	0,00	0,0	0,00	0	270	360	0,000	0,010	0,118	0,00	0,04	-0,04	-0,01
																	0,0874

(torque médio)

Potencia real	2,7
Potencia máxima ideal	30,98
Limite Betz (59%)	18,28
Cp	0,089

Tabela 3: Análise teórica para a turbina vertical do tipo H (5 fólios)

O valor teórico obtido para o coeficiente de potência foi de aproximadamente 9%. Veremos ainda adiante se essa previsão é condizente com a realidade com alguns experimentos, mas era já esperado que o rendimento desse tipo de turbina fosse menos eficiente que a de eixo horizontal. A vantagem dessa configuração é que seu funcionamento independe da direção da velocidade do vento.

3.3.3. VAWT - SAVONIUS

A turbina de eixo vertical Savonius foi desenvolvida por S.J. Savonius no final da década de 20. A idéia consiste em repartir um cilindro em duas metades ao longo do plano central e deslocá-las ao longo do plano de corte. Uma geometria ótima foi obtida testando-se mais de 30 modelos diferentes. Segundo Savonius, a máxima eficiência por ele encontrada, para este tipo de turbina, foi de 31%. Isso significa que certamente forças de sustentação estão presentes no experimento em questão, uma vez que supera o máximo rendimento que se obtém somente com forças de arraste (ver seção 2.3.1.3).

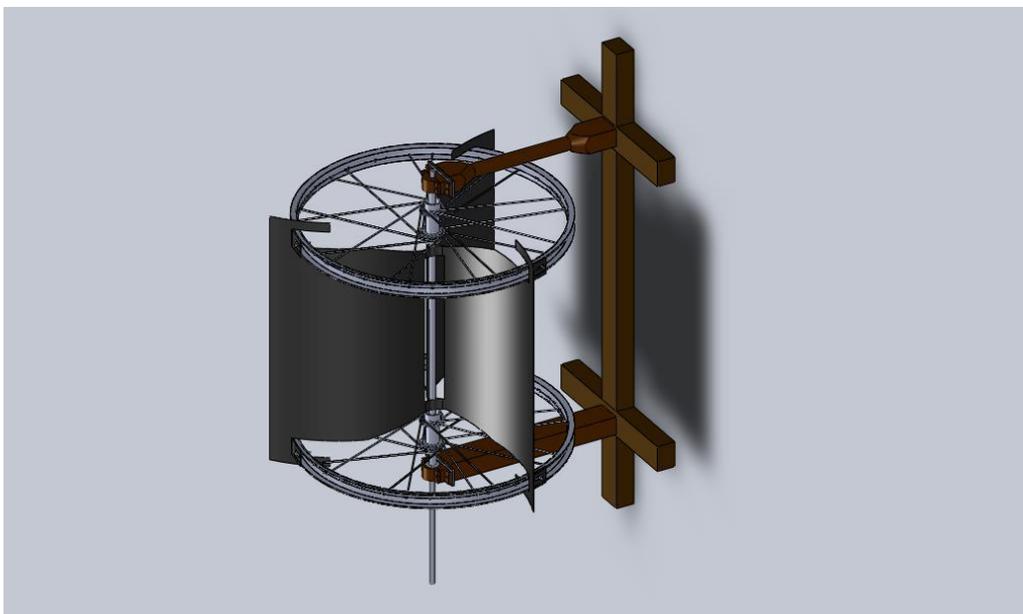


Figura 37: Esquema ilustrativo de uma turbina Savonius modificada – 3 pás (VAWT)

Seguindo o modelo de Savonius, experimentos de Sheldahl et al. (1978), Sivasegaram (1978), Newman, Khan, Ushikawa e Nagai (1988), chegou-se a um design considerado ótimo, descrito a seguir:

$$G = \left(\frac{a}{2.R} \right) = 0,15 \quad (3.19)$$

$$D_0 = 1,1.D \quad (3.20)$$

$$A_s = \left(\frac{H}{D} \right) = 1, \quad (3.21)$$

Onde “**D**” é o diâmetro do rotor; “**H**” é sua altura e “**a**” é o “overlap”.

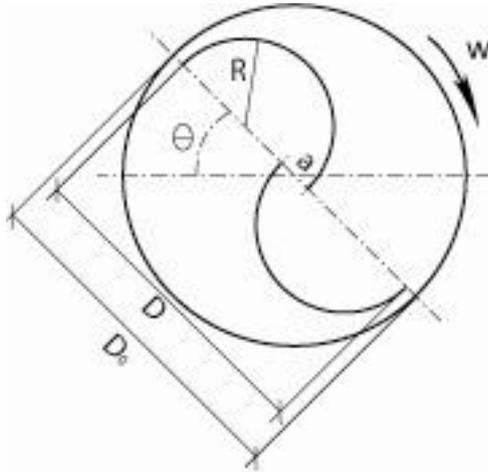


Figura 38: Vista superior de uma turbina do tipo Savonius.

Em artigo publicado pelo Instituto Nacional de Tecnologia da Índia, verificou-se que o coeficiente de potência para uma turbina do tipo Savonius atinge valores máximos que variam entre 16% e 25%; variação esta que dependeu do comprimento do overlap adotado ^[17].

Neste caso não será feita uma abordagem matemática devido à complexidade do escoamento neste tipo de turbina. Para um estudo mais preciso, seria interessante simular essa configuração numericamente utilizando algum programa CFD (Computational Fluid Dynamics) capaz de resolver as equações fundamentais da mecânica dos fluidos (conservação da massa, conservação do momento angular e linear etc). Na seção 2.3.1.3. foi determinado que o valor de rendimento máximo para uma turbina que baseia-se exclusivamente do princípio de arrasto seria de aproximadamente 20%. Almeja-se desta forma, verificar se a utilização de uma configuração do tipo Savonius poderia aproximar-se deste valor.

4. PROJETO EXECUTIVO

4.1. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

4.1.1. HAWT – “CATAVENTO”

Nesta primeira configuração, alguns formatos de pás foram desenhados. Inicialmente a idéia era utilizar uma pá com o formato triangular em sua traseira, com o bordo de ataque paralelo ao raio da roda de bicicleta. A figura a seguir mostra esse primeiro conceito. O formato triangular foi pensado devido à velocidade relativa do vento ser proporcional ao raio da seção e, portanto, pensando na conservação de massa, a partícula de vento mais próxima ao centro da roda percorre uma distância menor que aquela situada na ponta da pá.

O formato, embora atraente à primeira vista, apresentou alguns aspectos negativos: elevada flexibilidade e impossibilidade de se alterar o ângulo de ataque à medida que se afastava do centro da roda. Entretanto, a fixação na roda mostrou-se eficiente, através de um arame no cubo da roda (o qual já apresentava uma furação adequada) e outro no bordo de ataque da pá, passando através de um furo no aro da roda (vide figura 31).



Figura 39: Formato da pá da turbina do tipo cata-vento (conceito inicial)

Levando em consideração esses aspectos, decidiu-se alterar o formato das pás, de modo a eliminar ou reduzir as desvantagens que as mesmas apresentavam. Atendendo a um dos objetivos mais importantes, a parte anterior da pá foi estendida, de modo que possibilitasse a sua torção para obter um ângulo de ataque. A parte

posterior, por sua vez, foi reduzida de modo a diminuir a flexibilidade da pá. Afixação das pás acabou sendo dificultada, mas foi resolvida com um “rasgo” desde o bordo de ataque até aproximadamente o centro da pá. Um parafuso passante pela pá e pela roda, juntamente com um pequeno pedaço de arame passando pela base da pá e pelo cubo da roda, foram suficientes para manter o conjunto roda-pá rígido. Pela simetria, foram utilizadas no total 9 pás.

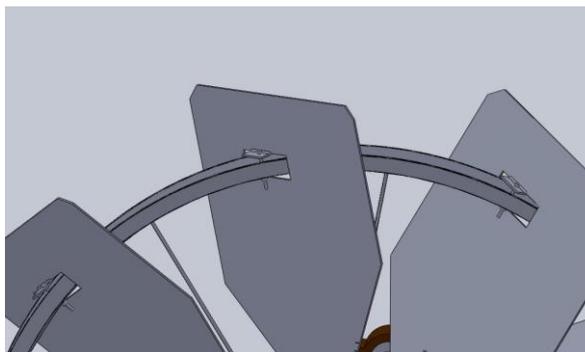


Figura 40. Detalhe ilustrativo da fixação das pás da turbina de rotor do tipo H (fólio) nos aros das rodas.



Figura 41. Detalhes construtivos da fixação das pás da turbina de rotor do tipo H (fólio) nos aros das rodas.

4.1.2. VAWT – ROTOR DO TIPO H (fólios)

A maior dificuldade na fabricação da turbina eólica de rotor do tipo H foi a construção dos fólios. Desejava-se que os mesmos fossem leves e resistentes a solicitações mecânicas, impactos, chuva, etc. Uma solução encontrada foi fabricá-los com fibra de vidro.

O perfil selecionado foi utilizado para conformar uma chapa de aço que serviu como gabarito para metade de um perfil completo do fólio, para permitir o destaque do laminado (vide figura 55). O conhecimento para a execução da laminação com fibra de vidro foi adquirida através de um curso oferecido pela própria empresa onde se adquiriu os materiais de laminação, a AeroJet Brasileira de Fiberglass, localizada na Rua da Paz de número 637.



Figura 42: Gabarito (chapa de aço) e o laminado (meio perfil do fólio)

As laminações foram feitas com um tecido emaranhado de fibra de vidro (manta) de gramatura de 450 g/m^2 e resina poliéster, aplicando-se na face interior da chapa de aço com o intuito de deixar a face externa do fólio (modelo a ser destacado) com um acabamento mais liso. Duas metades são feitas e depois colocadas juntas, fazendo-se uma laminação de emenda no bordo de ataque. O resultado final pode ser visualizado na figura 56 e 57.



Figuras 43 e 44: Detalhes da montagem final do fólio (para fixação nas rodas)

Para a construção desta turbina foram utilizadas as duas rodas de bicicleta para facilitar os paralelismos na fixação dos fólhos, que se deu por meio de furações no aro da roda e pelo uso de roscas e cantoneiras. O resultado final foi satisfatório e atendeu os objetivos de execução deste protótipo, no entanto os fólhos não ficaram simétricos como se desejava e apresentaram uma rugosidade elevada. Uma técnica mais refinada e um pós-tratamento resolveriam esse quadro, para uma próxima confecção.

Foram feitos cinco fólhos completos e foi decidido usá-los todos para a experiência, apesar disso ser uma escolha. Desta forma, os fólhos foram fixados com uma diferença angular entre si de aproximadamente 72 graus. Procurou-se manter o plano da corda do fólio paralelo ao plano que contém as tangentes da roda, de maneira que o ângulo de inclinação do fólio fosse nulo. Detalhes da montagem final podem ser visualizados com as imagens a seguir. Nas figuras, a cantoneira é usada para manter o fólio fixo à roda, enquanto que o parafuso adicional mais próximo ao bordo de ataque possui a função de modificar o ângulo de inclinação e auxiliar no seu travamento.

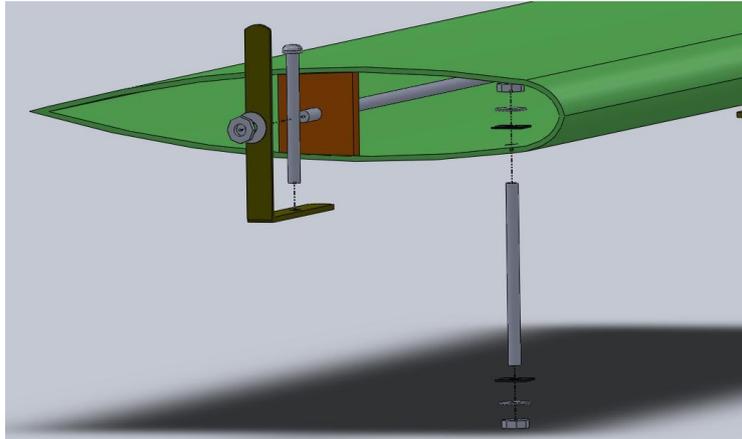


Figura 45. Detalhe do esquema de fixação adotado.

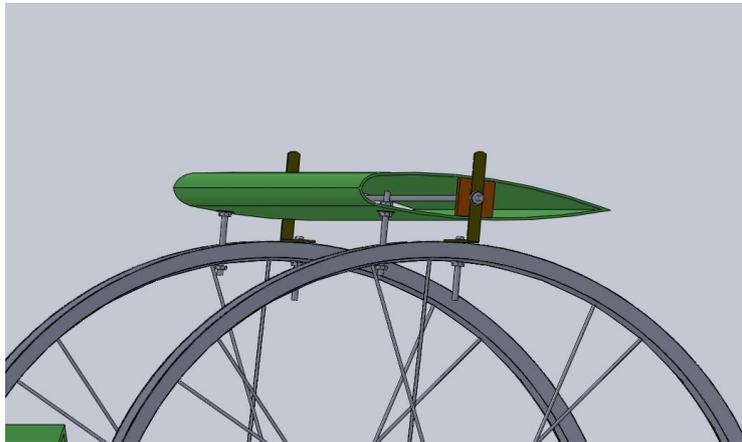


Figura 46. Detalhe da fixação do fólio nos aros das rodas.



Figura 47: Montagem final do fólio na roda.

4.1.3. VAWT - SAVONIUS

Esse tipo de configuração de turbina é o mais simples dos três. Foram utilizadas três chapas de aço para fabricação das pás, dando-lhes um formato adequado e inserindo-as entre as duas rodas de bicicleta. Cada pá é fixada às rodas por meio de parafusos e em sua base são feitas duas pequenas “lingüetas” para envolver o eixo e assim mantê-la fixa. A montagem utilizada é ilustrada na figura 53.

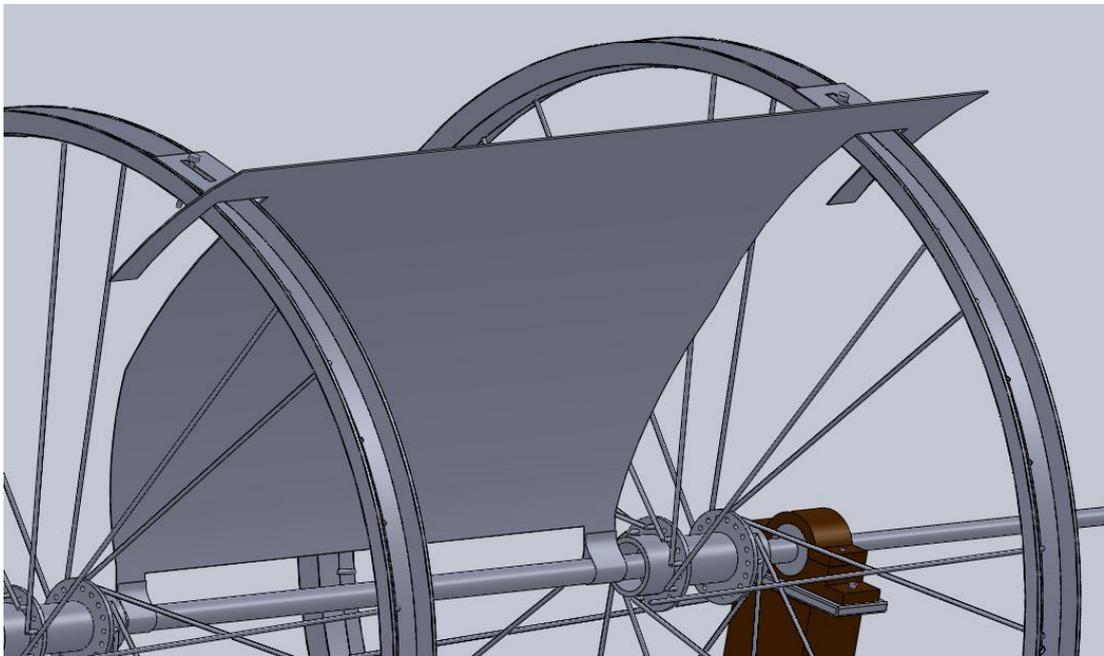


Figura 48. Esquema de montagem de uma pá da turbina do tipo Savonius nos aros das rodas.

Para cada chapa foi dado um formato curvo para melhorar a captação do vento, podendo ser modificado a critério do usuário. Além disso, na parte próxima ao eixo, foi retirada uma área retangular para permitir um escoamento interno entre as pás (como aquele verificado pelo overlap, na figura 19, da seção 2.3.2).

O peso de cada chapa é elevado, resultando infelizmente em um balanceamento indesejável do rotor. Isso poderia ser resolvido retirando-se uma quantidade de material de cada pá ou reposicionando-as. A montagem real finalizada pode ser visualizada na figura 53.



Figura 49: Montagem final da turbina do tipo Savonius (3 “pás”)

4.2. METODOLOGIA DOS EXPERIMENTOS

1) Medição do vento real:

A velocidade do vento foi feita por meio de um anemômetro manual, fabricado pela empresa alemã TFA. Esse equipamento permite a medição da velocidade instantânea do vento e também a sua velocidade média para um intervalo de tempo.



Figura 50: Embalagem do anemômetro manual utilizado

No presente estudo, foi adotada a velocidade média apurada durante 30 segundos simultâneos à medição do torque no eixo da turbina

2) Medição da velocidade de elevação da carga e potência da turbina:

Para a medição da potência gerada pela turbina foi fixada no eixo da mesma uma polia com sulco em V de aço carbono, com diâmetro de 120 mm no fundo do sulco (vide figura 59).

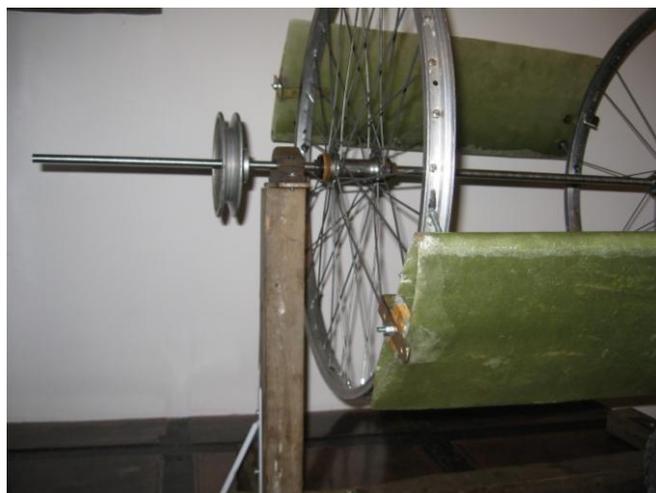


Figura 51: Detalhe da polia utilizada para medição.

As turbinas foram montadas na borda de uma plataforma a uma altura de 5,3 metros do nível do solo. Para cada protótipo foi fixada uma carga diversa em um cabo de algodão (barbante) de diâmetro 2 mm. A outra extremidade do cabo foi envolvida sobre a polia de modo frouxo, mas mantendo-se a extremidade livre, de tal modo que, a exemplo do que ocorre em cabrestantes (guinchos manuais de embarcação), o atrito entre o cabo a polia só viesse a tracionar o cabo e içar a carga, com deslocamento positivo (sem arraste entre polia e cabo), no instante em que a extremidade livre do cabo fosse tracionada.

A carga ficou posicionada no solo e a turbina na plataforma. O intervalo de tempo para a turbina, sem carga, atingir uma rotação constante a partir do repouso, é da ordem de 10 segundos para a turbina de eixo horizontal e de 15 segundos para as de eixo vertical.

Com a turbina girando em rotação constante, foi tracionado o cabo e medido o tempo para a carga percorrer os últimos 4,3 metros do desnível de 5,3 m, de modo a minimizar o período de tempo de aceleração da carga. A velocidade de subida da

carga é determinada com esse tempo medido. A potência mecânica captada pela turbina foi possível se calculada pelo produto:

$$P[w] = F_{carga} [N] \cdot v[m/s] \quad (4.1)$$

Onde P é a potência, F_{carga} é o peso da carga e v é a velocidade com que esta última é erguida.

4.3. RESULTADOS

Para cada protótipo testado, foram feitas 16 medições, apresentadas a seguir.

1) Turbina de eixo horizontal do tipo cata-vento:

Os resultados obtidos para o caso da turbina de eixo horizontal do tipo cata-vento podem ser visualizados na tabela 4 (os resultados foram colocados em ordem crescente para a intensidade da velocidade do vento).

TESTES - Turbina do tipo catavento

	Vento (m/s)	Potencia medida (W)	Potencia Ideal (W)	Cp
1	3,5	3,18	10,62	0,299
2	3,5	3,44	10,62	0,324
3	3,7	3,44	12,55	0,274
4	3,9	4,13	14,70	0,281
5	4	3,75	15,86	0,237
6	4,2	4,13	18,36	0,225
7	4,4	4,13	21,11	0,196
8	5	5,16	30,98	0,167
9	5	4,59	30,98	0,148
10	5,1	5,16	32,87	0,157
11	5,4	5,90	39,02	0,151
12	5,7	5,90	45,89	0,128
13	5,8	5,90	48,35	0,122
14	6	6,88	53,52	0,129
15	6,1	6,88	56,25	0,122
16	6,1	6,88	56,25	0,122

Tabela 4: Resultados obtidos experimentalmente para a turbina de eixo horizontal do tipo cata-vento

Colocando a velocidade do vento crescente para o eixo das abscissas, obtém-se o seguinte gráfico:

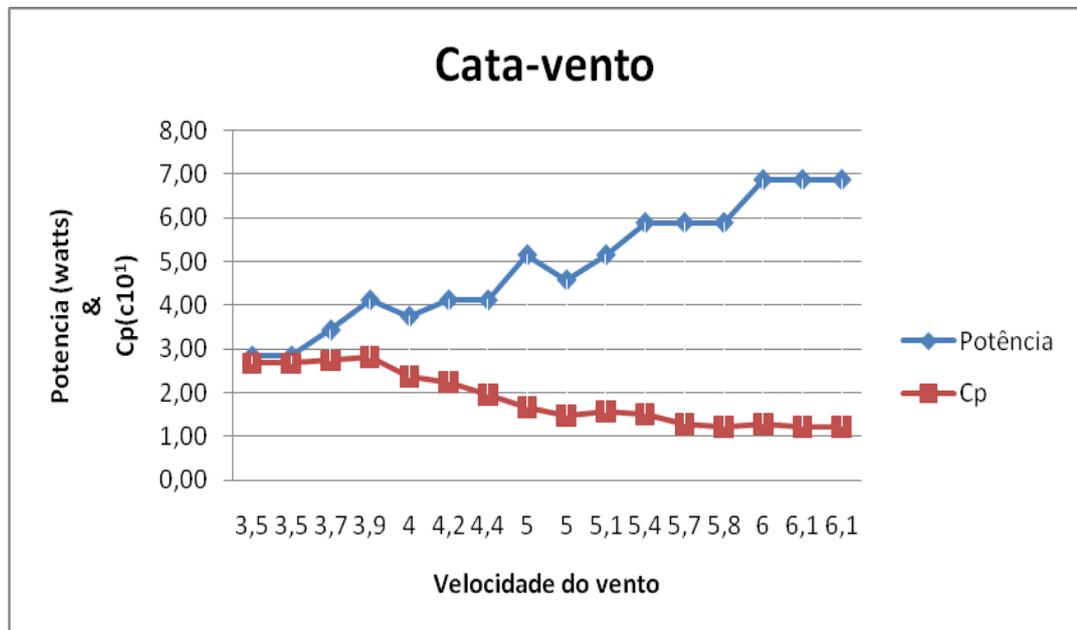


Figura 52: Desempenho da turbina do tipo cata-vento em função da velocidade do vento.

2) Turbina de eixo vertical de rotor do tipo H (fólios):

A tabela 5 a seguir fornece os resultados experimentais obtidos para a turbina de eixo vertical de rotor do tipo H:

TESTES - Turbina de rotor do tipo H (fólios)

	Vento (m/s)	Potencia medida (W)	Potencia Ideal (W)	Cp
1	3	0,32	6,69	0,048
2	3	0,37	6,69	0,056
3	3,1	0,52	7,38	0,070
4	3,5	0,45	10,62	0,042
5	3,5	0,48	10,62	0,045
6	3,5	0,52	10,62	0,049
7	3,6	0,56	11,56	0,049
8	3,8	0,61	13,60	0,045
9	3,8	0,61	13,60	0,045
10	3,9	0,56	14,70	0,038
11	4	0,75	15,86	0,047
12	4,1	0,67	17,08	0,039
13	4,2	0,61	18,36	0,033
14	5,1	0,67	32,87	0,021
15	5,3	0,84	36,89	0,023
16	6,4	0,84	64,96	0,013

Tabela 5: Resultados obtidos experimentalmente para a turbina de eixo vertical de rotor do tipo H (fólios)

Plotando os resultados anteriores em um gráfico, podemos observar o comportamento da potência gerada e Cp em função da velocidade do vento (figura).

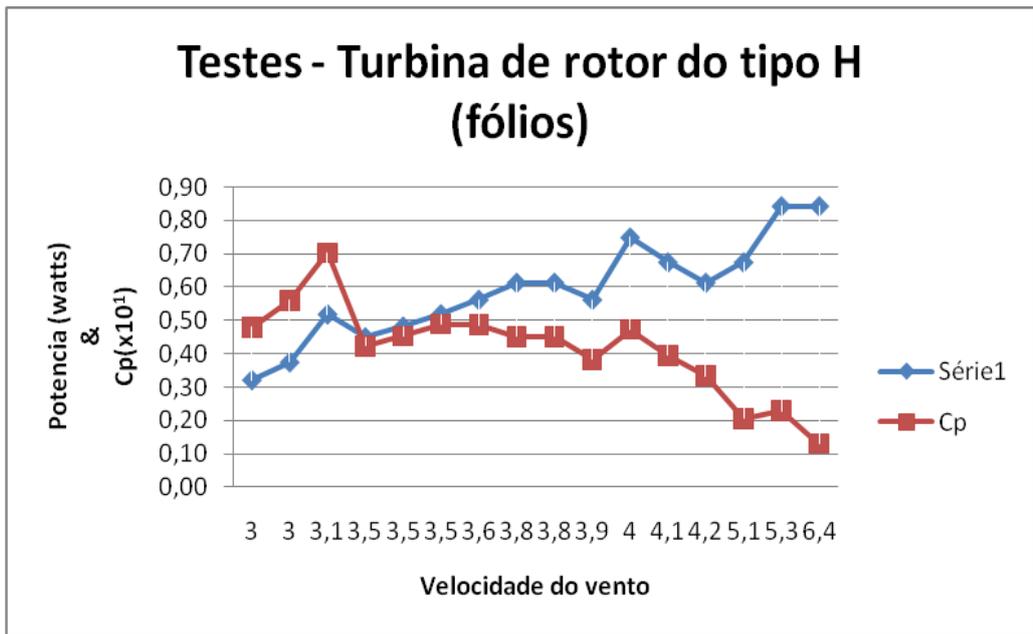


Figura 53: Desempenho da turbina de rotor do tipo H em função da velocidade do vento.

3) Turbina de eixo vertical do tipo Savonius

Por último, os resultados obtidos para a turbina do tipo Savonius podem ser verificados na tabela 5.

TESTES - Turbina do tipo Savonius

	Vento (m/s)	Potencia medida (W)	Potencia Ideal (W)	Cp
1	3	1,05	6,69	0,157
2	3,2	1,05	8,12	0,130
3	3,4	1,15	9,74	0,118
4	3,7	1,40	12,55	0,112
5	4	1,49	15,86	0,094
6	4,1	1,40	17,08	0,082
7	4,4	1,58	21,11	0,075
8	5	2,11	30,98	0,068
9	5	1,81	30,98	0,058
10	5,1	2,11	32,87	0,064
11	5,4	2,53	39,02	0,065
12	5,7	2,69	45,89	0,059
13	5,8	2,75	48,35	0,057
14	5,9	2,53	50,89	0,050
15	6	2,43	53,52	0,045
16	6,1	2,81	56,25	0,050

Tabela 6: Resultados obtidos experimentalmente para a turbina de eixo vertical do tipo Savonius

Plotando os valores acima em um gráfico, obtemos:

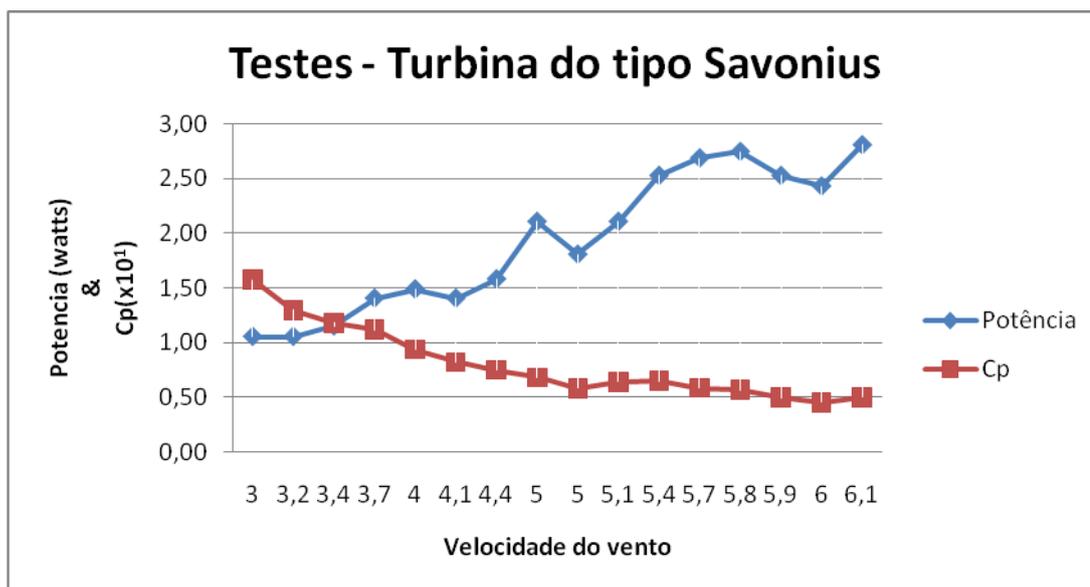


Figura 54: Desempenho da turbina do tipo Savonius em função da velocidade do vento.

5. CONCLUSÃO

A necessidade atual por novas fontes de energia estimula o ser humano a contribuir com a economia de energia do mundo, seja pela utilização de fontes alternativas de energia, seja por um comportamento pró-sustentável. O presente trabalho se baseou na possibilidade de que, com um pouco de tempo, dedicação e capital, podemos fazer pequenas contribuições no uso consciente e sustentável da energia. Foram fabricadas e testadas três diferentes tipos de turbina, cada qual apresentando suas características de construção e aplicabilidade. Uma observação importante é que o projeto realizado comporta-se como uma bancada de testes, uma vez que permite ainda muitas medições e experiências para outras configurações de turbina.

Verificou-se experimentalmente que a turbina que apresenta melhor desempenho é a de eixo horizontal do tipo cata-vento. A desvantagem associada a este tipo de turbina é a dependência de sua eficiência com relação à direção do vento. Isso não chega a ser um problema para o caso estudado, uma vez que as direções do vento da represa Guarapiranga são normalmente constantes; no entanto, para uma aplicação diversa, seria interessante o desenvolvimento de um dispositivo que permitisse o acompanhamento da turbina de acordo com a direção do vento.

Um fato interessante a ser mencionado são as partidas dos três tipos de aerogeradores. A turbina de eixo horizontal do tipo catavento possui uma partida muito intensa, uma vez que um elevado torque é transmitido ao rotor da turbina mesmo quando esta se encontra sem nenhum movimento.

No caso da turbina eólica de eixo vertical de fólhos (rotor do tipo H), isso não se verifica: nos experimentos realizados com a mesma foi até necessário um pequeno estímulo para dar início à rotação. Entretanto, observou-se que este tipo de turbina aproveita muito mais os efeitos aerodinâmicos quando o rotor se encontra em elevadas rotações, uma vez que depende essencialmente da velocidade relativa com que os fólhos “enxergam” o vento. Em outras palavras, quando em rotação elevada, os fólhos aproveitam melhor o efeito da sustentação.

No caso da turbina de eixo vertical Savonius, verificou-se uma rotação muito pequena, mas com um torque considerável. A desvantagem deste tipo de turbina é

que, além rotação da mesma estar sempre limitada à velocidade do vento, apresenta um torque resistivo elevado.

No que diz respeito à execução dos protótipos, encontrou-se uma maior dificuldade na fabricação da turbina de eixo vertical de fólios. O uso de fibra de vidro foi uma aplicação interessante e que gerou resultados satisfatórios, provendo elevada resistência mecânica. Acredita-se, no entanto, que outras opções eficazes poderiam ser adotadas e que levariam a resultados qualitativamente bem sucedidos como, por exemplo, realizar a laminação diretamente sobre uma peça com o formato do fólio desejado, a fim de evitar problemas de simetria.

Os resultados empíricos obtidos apresentaram valores um pouco diferentes daqueles esperados e analisados teoricamente. Explica-se isso pelos motivos das aproximações feitas tanto nos experimentos como nos cálculos: assim como a metodologia utilizada para a medição da potência apresentar imprecisões devido às diversas variáveis presentes nas experiências, os cálculos também merecem maior desenvolvimento, no que diz respeito a estudos aerodinâmicos mais profundos sobre o comportamento do escoamento de ar nas turbinas. A utilização de softwares comerciais, como o Fluent, poderia prover um melhor embasamento teórico e informações úteis para o presente trabalho, sendo uma indicação para quem deseja se aprofundar mais sobre o tema.

Finalizando, este trabalho é fruto de uma ambição pessoal no sentido de se criar um dispositivo, à base de recursos limitados, que pudesse oferecer benefícios para o ser humano, no caso uma fonte de energia. O uso deste produto, desta energia, estará sempre disponível desde que haja vento e, mesmo que a quantidade gerada seja pequena, ainda pode ser útil para muitas aplicações. Uma idéia interessante seria a de armazenar energia através do uso de baterias, sendo a energia eólica uma fonte intermitente de energia e que por isso torna seu uso direto um pouco complicado.

Assim como este projeto foi estimulado por outros trabalhos realizados neste campo, deseja-se também que este seja útil para outros que queiram explorar o “tema”*.

*Vídeos deste trabalho demonstrando alguns experimentos podem ser visualizados no site de vídeos público www.youtube.com. Se é do interesse do leitor, procurar por henriquesimonsen no campo de busca.

6. ANEXOS

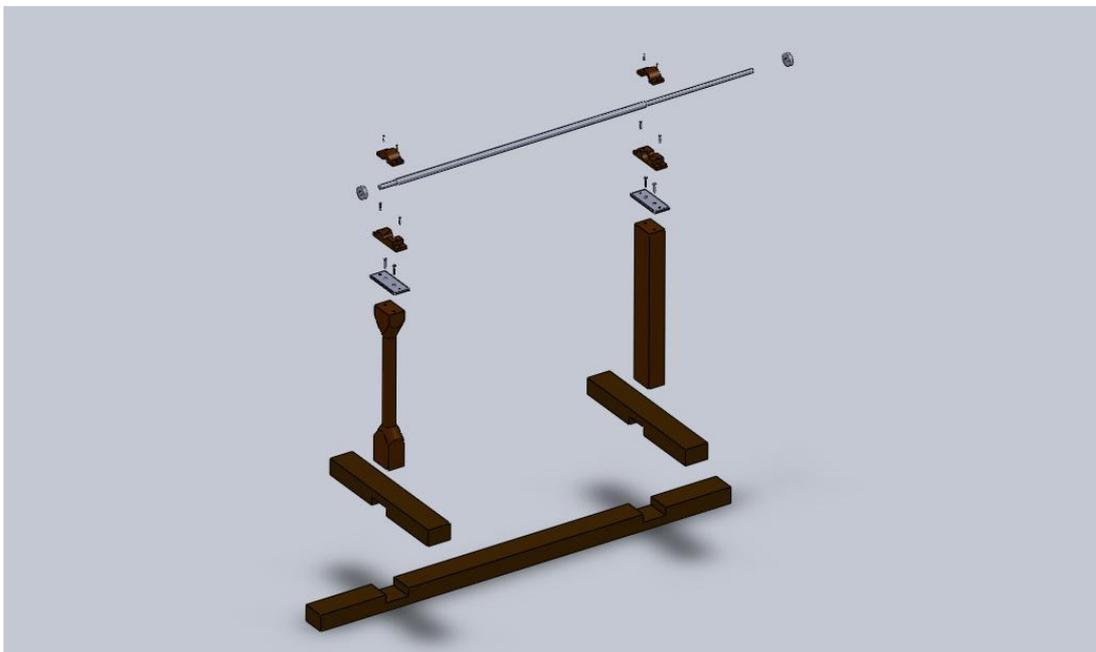


Figura 55. Vista explodida da estrutura básica.



Figura 56. VAWT (fólios)



Figura 57. HAWT (catavento)



Figura 58. VAWT (Savonius)

7. BIBLIOGRAFIA

- <http://www2.petrobras.com.br/meioambiente/portugues/desenvolvimento/desindex.htm#1> Acessado em 14/outubro/2009
- ERNST & YOUNG. **Sustainable Brazil – Energy Market Challenges**. Publicação 28 janeiro 2009, 24p. Disponível em <http://www.ey.com/BR/pt/Home>. Acesso em 17 out. 2009;
- Revista **IDÉIA SOCIAMBIENTAL**. Ano 5, Edição nº 17. 114p.
- [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/06-Energia_Eolica(3).pdf) – acessado em 25 out. 2009.
- <http://economia.uol.com.br/ultnot/valor/2009/07/16/ult1913u110056.jhtm> – acessado em 18 set 2009;]
- <http://www.osestoreletrico.com.br/ose/index.php?page=site.ViewMateria&id=11&dmatéria=35>, acessado em 27 out 2009.
- MAZER,Thiago Tazinazzo “**Otimização da Eficiência de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal através de Simulação Numérica**” Trabalho de Formatura EPUSP 2005;
- SAMMARONE, José F.R.. “**Processo de Otimização de uma Turbina Eólica de Eixo Horizontal através de Simulação Numérica**” Trabalho de Formatura EPUSP 2004;
- SAHEKI, Laércio Seiti “**Otimização de sistemas Alternativos de Geração de Energia para Aplicação em Conjunto Residencial**” Trabalho de Formatura EPUSP 2005;
- TORRES, Henrique J. R; PORTUGAL, Marcos P. P.. “**Projeto de um gerador eólico para uso residencial**” Trabalho de Formatura EPUSP 2004;
- LUBOSNY, Z. “**Wind Turbine Operation in Electric Power Systems**” New York: Springer, 200, 259 p.
- FOX, Brendan et al. “**Wind Power Integration: Connection and System Operational Aspects**”. London: IET (The Institution of Engineering and Technology), 2007, 279 p

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Séries Completas da Empresa de Pesquisa Energética. “**Capítulo 3 (Consumo de Energia por Setor) 1970-2007**”. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx> – acessado em 10 set 2009;
- [2] United Nations Environment Programme (UNEP). “**Global Trends in Sustainable Energy Investment 2009**”, 2009. Disponível em: <http://sefi.unep.org>. Acesso em 20 de out. 2009;
- [3] CRESEB. “**Tutorial de Energia Eólica – Princípios e Tecnologias**”. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/> - Acesso em set. 2009;
- [4] <http://www.ecodebate.com.br/2009/09/17/eletrobras-prepara-novo-atlas-eolico-nacional/> - novo atlas eólico nacional – acessado em 26 out. 2009.
- [5] “**10º Encontro Internacional de Energia**” Energia eólica na matriz energética do Brasil (apresentação de Lauro Fiúza Junior)-, disponível em: <http://www.ciespsul.com.br/energia/telas/pdfs/06/Lauro-Fiuza.pdf>;
- [6] DANTAS, Guilherme; LEITE, André. Grupo de Estudos do Setor Eólico (GESEL). “Os Custos da Energia Eólica Brasileira”. Disponível em www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/biblioteca
- [7] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). “**Informe à Imprensa: Leilão de Energia de Reserva – Eólica**”. Disponível em http://www.epe.gov.br/imprensa/PressReleases/20090716_1.pdf
- [8] Morgan CA, Gardner P, Mays ID, Anderson MB. “**The demonstration of a stall regulated 100 kW vertical axis wind turbine**”. Disponível em: Proceedings 1989 European wind energy conference, Glasgow, Scotland, 1989; 645–49.
- [9] ASHWILL, T.D. **Measured data for the Sandia 34-meter vertical axis wind turbine**. Sandia National Laboratories 1992; SAND91-2228.
- [10] MULJADI, E.; PIERCE K.; MIGLIORE P. “**Control strategy for variable-speed, stall-regulated wind turbines**”. National Renewable Energy Laboratory 1989; NREL/CP-500-24311-UC Category:1211.

- [11] LUBOSNY, Z. **Wind Turbine Operation in Electric Power Systems**. New York: Springer, 2003, 259 p.
- [12] ERIKSSON, Sandra; BERNHOFF, Hans; LEIJON, Mats. “**Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power**”. Artigo disponível em <www.science-direct.com>. Acesso em 22 de novembro de 2009.
- [13] RIEGLER, Hannes. “**HAWT Versus VAWT**”. Disponível em <<http://www.victordanilochkin.org/research/turbine/papers/HAWT%20versus.pdf>>. Acesso em 26 novembro de 2009.
- [14] FOX, Brendan et al. “**Wind Power Integration: Connection and System Operational Aspects**”. London: IET (The Institution of Engineering and Technology), p. 62.
- [15] M. Predescu et al. “**Wind Tunnel Assessment of Small Direct Drive Wind Turbines with Permanent Magnets Synchronous Generators**”, ICREPQ, 2008.
- [16] Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C., “**Aerodynamic Characteristics of Seven Airfoil Sections Through 180 Degrees Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines**”, March 1981, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. (disponível em <http://www.cyberiad.net/library/airfoils/foildata/n0012cl.htm>).
- [17] Gupta, R. Das and K.K. Sharma, “**Experimental Study of a Savonius-Darrieus Wind Machine**”, Dept. of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Silchar, Assam India.
- [18] Fujisawa, N. and Gotoh, F., “**Visualization Study of the flow in and Around a Savonius Rotor**”, 1992, Dept of Mechanical Engineering, Gunma University, Kiryu, Japan.
- [19] Dados do catalogo de produtos da empresa SKF. Disponível em: www.skf.com, Acesso em junho de 2010.
- [20] TORRES, Henrique J. R; PORTUGAL, Marcos P. P.. “**Projeto de um gerador eólico para uso residencial**” Trabalho de Formatura EPUSP 2004;
- [21] BARTOLAZZI, Andrea. “**Le energie rinnovabili**”. Milano, editora HOEPL 2007.