

Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
Sérgio de Salvo Brito



ENERGIA EÓLICA
PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS

Equipe CEPEL / CRESESB

Website: <http://www.cresesb.cepel.br>

E-mail: crese@cepel.br

Revisão, Ampliação e Atualização por
Ricardo Marques Dutra - Maio/2008

CEPEL 
Grupo Eletrobrás

ENERGIA EÓLICA - PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS

1	<i>História da Energia Eólica e suas utilizações</i>	3
1.1	Desenvolvimento dos Aerogeradores no Século XX	6
1.2	A evolução comercial de turbinas eólicas de grande porte	11
1.3	A potência eólica instalada no mundo	12
2	<i>O Recurso Eólico</i>	14
2.1	Mecanismos de Geração dos Ventos	14
2.2	Fatores que influenciam o regime dos ventos	16
3	<i>Energia e Potência Extraída do Vento</i>	18
4	<i>Tipos de Turbinas Eólicas para Geração de Energia Elétrica</i>	24
4.1	Rotores de Eixo Vertical	24
4.2	Rotores de Eixo Horizontal	24
4.3	Mecanismo de Controle	32
5	<i>Sistema Elétrico de um aerogerador e qualidade de energia</i>	37
5.1	Aerogeradores com velocidade constante	37
5.2	Aerogeradores com velocidade variável	38
5.3	Qualidade da energia	39
6	<i>Aplicações dos Sistemas Eólicos</i>	42
6.1	Sistemas Isolados	42
6.2	Sistemas Híbridos	43
6.3	Sistemas Interligados à Rede	44
6.4	Sistemas Off-Shore	45
7	<i>Bibliografia</i>	47
	<i>ANEXO I - Mapa de temático da Velocidade Média Anual do Vento a 50 metros de Altura em m/s</i>	50
	<i>ANEXO II - Usinas Eólicas em Operação No Brasil</i>	51

1 HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA E SUAS UTILIZAÇÕES

Com o avanço da agricultura, o homem necessitava cada vez mais de ferramentas que o auxiliassem nas diversas etapas do trabalho. Tarefas como a moagem dos grãos e o bombeamento de água exigiam cada vez mais esforço braçal e animal. Isso levou ao desenvolvimento de uma forma primitiva de moinho de vento, utilizada no beneficiamento dos produtos agrícolas, que constava de um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, movida por homens ou animais caminhando numa gaiola circular. Existia também outra tecnologia utilizada para o beneficiamento da agricultura onde uma gaiola cilíndrica era conectada a um eixo horizontal e a força motriz (homens ou animais) caminhava no seu interior.

Esse sistema foi aperfeiçoado com a utilização de cursos d'água como força motriz surgindo, assim, as rodas d'água. Historicamente, o uso das rodas d'água precede a utilização dos moinhos de ventos devido a sua concepção mais simplista de utilização de cursos naturais de rios como força motriz. Como não se dispunha de rios em todos os lugares para o aproveitamento em rodas d'água, a percepção do vento como fonte natural de energia possibilitou o surgimento de moinhos de ventos substituindo a força motriz humana ou animal nas atividades agrícolas.

O primeiro registro histórico da utilização da energia eólica para bombeamento de água e moagem de grãos através de cata-ventos é proveniente da Pérsia, por volta de 200 A.C.. Esse tipo de moinho de eixo vertical veio a se espalhar pelo mundo islâmico sendo utilizado por vários séculos. Acredita-se que antes da invenção dos cata-ventos na Pérsia, a China (por volta de 2000 A.C.) e o Império Babilônico (por volta 1700 A.C) também utilizavam cata-ventos rústicos para irrigação (CHESF-BRASCEP, 1987). (SHEPHERD, 1994)

Mesmo com baixa eficiência devido a suas características, os cata-ventos primitivos apresentavam vantagens importantes para o desenvolvimento das necessidades básicas de bombeamento d'água ou moagem de grãos, substituindo a força motriz humana ou animal. Pouco se sabe sobre o desenvolvimento e uso dos cata-ventos primitivos da China e Oriente Médio como também dos cata-ventos surgidos no Mediterrâneo. Um importante desenvolvimento da tecnologia primitiva foram os primeiros modelos a



utilizarem velas de sustentação em eixo horizontal encontrados nas ilhas gregas do Mediterrâneo.

A introdução dos cata-ventos na Europa deu-se, principalmente, no retorno das Cruzadas há 900 anos. Os cata-ventos foram largamente utilizados e seu desenvolvimento bem documentado. As máquinas primitivas persistiram até o século XII quando começaram a ser utilizados moinhos de eixo horizontal na Inglaterra, França e Holanda, entre outros países. Os moinhos de vento de eixo horizontal do tipo “holandês” foram rapidamente disseminados em vários países da Europa. Durante a Idade Média, na Europa, a maioria das leis feudais incluía o direito de recusar a permissão à construção de moinhos de vento pelos camponeses, o que os obrigava a usar os moinhos dos senhores feudais para a moagem dos seus grãos. Dentro das leis de concessão de moinhos também se estabeleceram leis que proibiam a plantação de árvores próximas ao moinho assegurando, assim, o “direito ao vento”. Os moinhos de vento na Europa tiveram, sem dúvida, uma forte e decisiva influência na economia agrícola por vários séculos. Com o desenvolvimento tecnológico das pás, sistema de controle, eixos etc, o uso dos moinhos de vento propiciou a otimização de várias atividades utilizando-se a força motriz do vento.

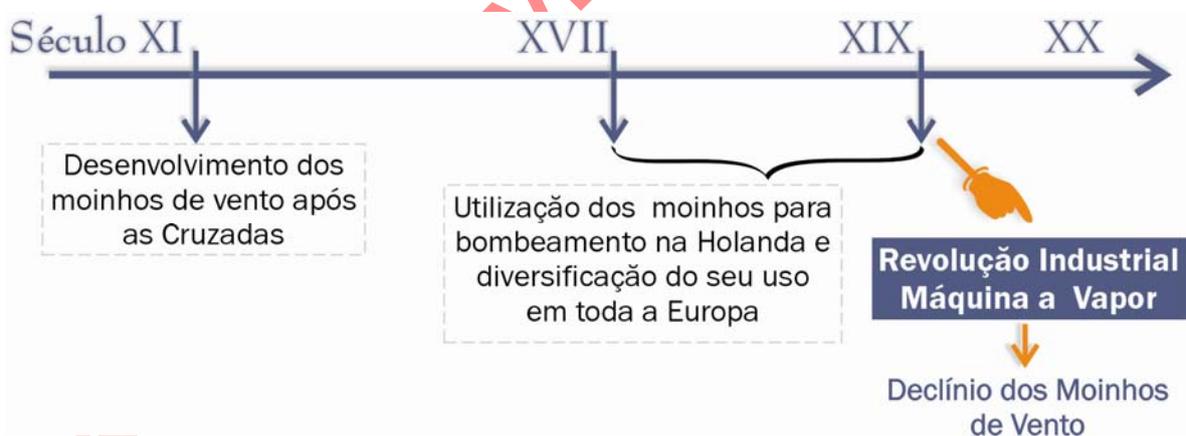


Figura 1 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Século XI ao Século XIX (Fonte: Dutra, 2001)

Na Holanda, durante os séculos XVII a XIX, o uso de moinhos de vento em grande escala esteve relacionado amplamente com a drenagem de terras cobertas pelas águas. A área de Beemster Polder, que ficava três metros abaixo do nível do mar, foi drenada por

26 moinhos de vento de até 50 HP cada, entre os anos de 1608 e 1612. Mais tarde, a região de Schermer Polder também foi drenada por 36 moinhos de vento durante quatro anos, a uma vazão total de 1000 m³/min.(SHEPHERD, 1994) Os moinhos de vento na Holanda tiveram uma grande variedade de aplicações. O primeiro moinho de vento utilizado para a produção de óleos vegetais foi construído em 1582. Com o surgimento da imprensa e o rápido crescimento da demanda por papel, foi construído, em 1586, o primeiro moinho de vento para fabricação de papel. Ao fim do século XVI, surgiram moinhos de vento para acionar serrarias para processar madeiras provenientes do Mar Báltico. Em meados do século XIX, aproximadamente 9000 moinhos de vento existiam em pleno funcionamento na Holanda. (WADE, 1979 *apud* CHESF-BRASCEP, 1987) O número de moinhos de vento na Europa nesse período mostra a importância do seu uso em diversos países como a Bélgica (3000 moinhos de vento), Inglaterra (10000 moinhos de vento) e França (650 moinhos de vento na região de Anjou)(CHESF-BRASCEP, 1987).



Figura 2 – Moinho de vento típico da Holanda

Um importante marco para a energia eólica na Europa foi a Revolução Industrial do final do Século XIX. Com o surgimento da máquina a vapor, iniciou-se o declínio do uso da energia eólica na Holanda. Já no início do século XX, existiam apenas 2500 moinhos de ventos em operação, caindo para menos de 1000 no ano de 1960.(CHESF-BRASCEP,

1987) Preocupados com a extinção dos moinhos de vento pelo novo conceito imposto pela Revolução Industrial, foi criada, em 1923, uma sociedade holandesa para conservação, melhoria de desempenho e utilização mais efetiva dos moinhos holandeses.

A utilização de cata-ventos de múltiplas pás destinados ao bombeamento d'água desenvolveu-se de forma efetiva, em diversos países, principalmente nas suas áreas rurais. Acredita-se que desde a segunda metade do século XIX mais de 6 milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento d'água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas (CHESF-BRASCEP, 1987). Os cata-ventos de múltiplas pás foram usados também em outras regiões como a Austrália, Rússia, África e América Latina. O sistema se adaptou muito bem às condições rurais tendo em vista suas características de fácil operação e manutenção. Toda a estrutura era feita de metal e o sistema de bombeamento era feito por meio de bombas e pistões favorecidos pelo alto torque fornecido pela grande número de pás. Até hoje esse sistema é largamente usado em várias partes do mundo para bombeamento d'água.

1.1 Desenvolvimento dos Aerogeradores no Século XX

Com o avanço da rede elétrica, foram feitas, também no início do século XX, várias pesquisas para o aproveitamento da energia eólica em geração de grandes blocos de energia. Enquanto os Estados Unidos estavam difundindo o uso de aerogeradores de pequeno porte nas fazendas e residências rurais isoladas, a Rússia investia na conexão de aerogeradores de médio e grande porte diretamente na rede.

O início da adaptação dos cata-ventos para geração de energia elétrica teve início no final do século XIX. Em 1888, Charles F. Brush, um industrial voltado para eletrificação em campo, ergueu na cidade de Cleveland, Ohio, o primeiro cata-vento destinado a geração de energia elétrica. Tratava-se de um cata-vento que fornecia 12 kW em corrente contínua para carregamento de baterias as quais eram destinadas, sobretudo, para o fornecimento de energia para 350 lâmpadas incandescentes (SCIENTIFIC AMERICAN, 1890 *apud* SHEPHERD, 1994) (RIGHTER, 1991 *apud* SHEPHERD, 1994). Brush utilizou-se da configuração de um moinho para o seu invento. A roda principal, com suas 144 pás, tinha 17m de diâmetro em uma torre de 18m de altura. Todo o sistema era sustentado por



um tubo metálico central de 36 cm de diâmetro que possibilitava o giro de todo o sistema acompanhando, assim, o vento predominante. Esse sistema esteve em operação por 20 anos sendo desativado em 1908. Sem dúvida, o cata-vento de Bruch foi um marco na utilização dos cata-ventos para a geração de energia elétrica.

O invento de Bruch apresentava três importantes inovações para o desenvolvimento no uso da energia eólica para geração de energia elétrica. Em primeiro lugar, a altura utilizada pelo invento estava dentro das categorias dos moinhos de ventos utilizados para beneficiamento de grãos e bombeamento d'água. Em segundo lugar, foi introduzido um mecanismo de grande fator de multiplicação da rotação das pás (50:1) que funcionava em dois estágios possibilitando um máximo aproveitamento do dínamo cujo funcionamento estava em 500 rpm. Em terceiro lugar, esse invento foi a primeira e mais ambiciosa tentativa de se combinar a aerodinâmica e a estrutura dos moinhos de vento com as recentes inovações tecnológicas na produção de energia elétrica.

Um dos primeiros passos para o desenvolvimento de turbinas eólicas de grande porte para aplicações elétricas foi dado na Rússia em 1931. O aerogerador *Balaclava* (assim chamado) era um modelo avançado de 100 kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3 kV de 30 km, a uma usina termelétrica de 20 MW. Essa foi a primeira tentativa bem sucedida de se conectar um aerogerador de corrente alternada com uma usina termelétrica (SEKTOROV, 1934 *apud* SHEPHERD, 1994). A energia medida foi de 280.000 kWh.ano, o que significa um fator médio de utilização de 32%. O gerador e o sistema de controle ficavam no alto da torre de 30 metros de altura, e a rotação era controlada pela variação do ângulo de passo das pás. O controle da posição era feito através de uma estrutura em treliças inclinada apoiada sobre um vagão em uma pista circular de trilhos. (CHESF-BRASCEP, 1987)(SHEPHERD, 1994)

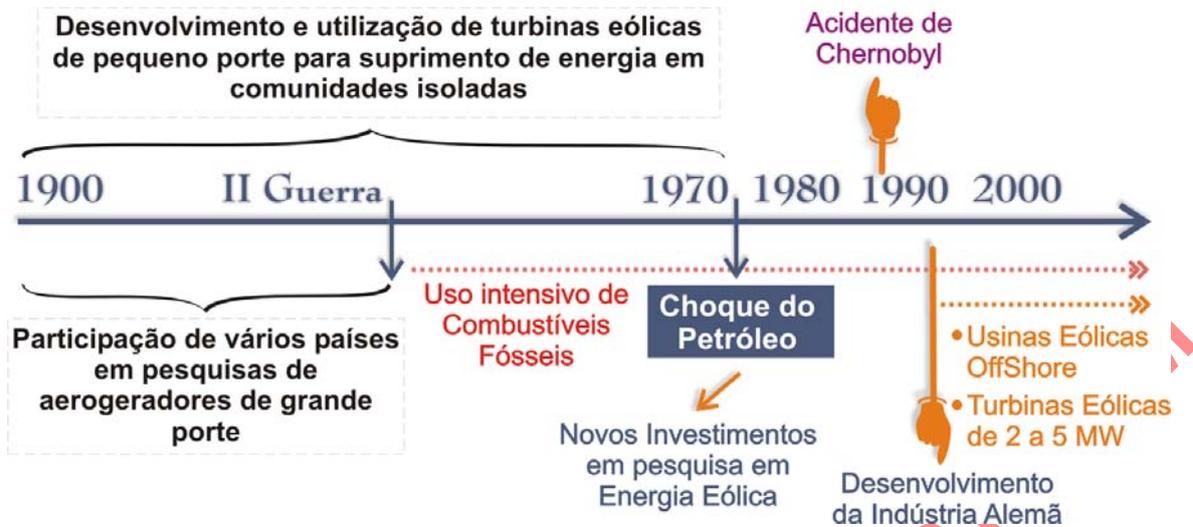


Figura 3 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX
(Fonte: Dutra, 2001)

Após o desenvolvimento desse modelo, foram projetados outros modelos mais ambiciosos de 1 MW e 5 MW. Aparentemente esses projetos não foram concluídos devido à forte concorrência de outras tecnologias, principalmente a tecnologia de combustíveis fósseis que, com o surgimento de novas reservas, tornava-se mais competitiva economicamente contribuindo, assim, para o abandono de projetos ambiciosos de aerogeradores de grande porte.

A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) contribuiu para o desenvolvimento dos aerogeradores de médio e grande porte uma vez que os países em geral empenhavam grandes esforços no sentido de economizar combustíveis fósseis. Os Estados Unidos desenvolveram um projeto de construção do maior aerogerador até então projetado. Tratava-se do aerogerador *Smith-Putnam* cujo modelo apresentava 53.3 m de diâmetro, uma torre de 33.5 m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, foi usado um gerador síncrono de 1250 kW com rotação constante de 28 rpm, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local. (VOADEN, 1943 *apud* SHEPHERD, 1994) (PUTNAM, 1948 *apud* SHEPHERD, 1994) (KOEPL, 1982 *apud* SHEPHERD, 1994) Esse aerogerador iniciou seu funcionamento em 10 de outubro de 1941, em uma colina de Vermont chamada Grandpa's Knob. Em março de 1945, após quatro anos de operação intermitente, uma das suas pás (que eram metálicas) quebrou-se por fadiga (SHEPHERD, 1994) (EWEA, 1998A).

Após o fim da Segunda Guerra, os combustíveis fósseis voltaram a abundar em todo o cenário mundial. Um estudo econômico na época mostrava que aquele aerogerador não era mais competitivo e, sendo assim, o projeto foi abandonado. Esse projeto foi pioneiro na organização de uma parceria entre a indústria e a universidade objetivando pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a geração de energia elétrica através dos ventos. Essa parceria viabilizou o projeto com o maior número de inovações tecnológicas até então posto em funcionamento.

De uma forma geral, após a Segunda Guerra Mundial, o petróleo e grandes usinas hidrelétricas se tornaram extremamente competitivos economicamente, e os aerogeradores foram construídos apenas para fins de pesquisa, utilizando e aprimorando técnicas aeronáuticas na operação e desenvolvimento de pás além de aperfeiçoamentos no sistema de geração. A Inglaterra, durante a década de cinquenta, promoveu um grande estudo anemométrico em 100 localidades das Ilhas Britânicas culminando, em 1955, com a instalação de um aerogerador experimental de 100 kW em Cape Costa, Ilhas Orkney (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994). Também na década de cinquenta, foi desenvolvido um raro modelo de aerogerador de 100 kW com as pás ocas e com a turbina e gerador na base da torre. Ambos os modelos desenvolvidos na Inglaterra foram abandonados por problemas operacionais e principalmente por desinteresse econômico.

A Dinamarca, no período inicial da 2ª Guerra Mundial, apresentou um dos mais significativos crescimentos em energia eólica em toda Europa. Esse avanço deu-se sob a direção dos cientistas dinamarqueses Poul LaCour e Johannes Juul (JULL, 1964 *apud* DIVONE, 1994). Sendo um país pobre em fontes energéticas naturais, a utilização da energia eólica teve uma grande importância quando, no período entre as duas guerras mundiais, o consumo de óleo combustível estava racionado. Durante a 2ª Guerra Mundial, a companhia F.L.Smidth (F.L.S) foi a pioneira no desenvolvimento de uma série de aerogeradores de pequeno porte na faixa de 45 kW. Nesse período, a energia eólica na Dinamarca produzia, eventualmente, cerca de 4 milhões de quilowatt-hora anuais dada a grande utilização dessas turbinas em todo o país. O sucesso dos aerogeradores de pequeno porte da F.L.S, que ainda operavam em corrente contínua, possibilitou um projeto de grande porte ainda mais ousado. Projetado por Johannes Juul, um aerogerador de 200 kW com 24 m de diâmetro de rotor foi instalado nos anos de 1956 e 1957 na ilha de Gedser. Esse aerogerador apresentava três pás e era sustentado por uma torre de



concreto. O sistema forneceu energia em corrente alternada para a companhia elétrica SydØstsjællandss Elektricitets Aktieselskab (SEAS), no período entre 1958 até 1967, quando o fator de capacidade atingiu a meta de 20% em alguns dos anos de operação. (DIVONE, 1994) (EWEA, 1998a)

A França também se empenhou nas pesquisas de aerogeradores conectados à rede elétrica. Entre 1958 e 1966 foram construídos diversos aerogeradores de grande porte. Entre os principais estavam três aerogeradores de eixo horizontal e três pás. Um dos modelos apresentava 30 metros de diâmetro de pá com potência de 800 kW a vento de 16,5 m/s. Esse modelo esteve em operação, conectado a rede EDF, nos anos de 1958 a 1963 (CHESF-BRASCEP, 1987) (BONNEFILLE, 1974 *apud* DIVONE, 1994). Todo o sistema elétrico funcionou em estado satisfatório o que não ocorreu, entretanto, com diversas partes mecânicas. O mais importante desse projeto foi, sem dúvida, o bom funcionamento interligado à rede elétrica de corrente contínua. O segundo aerogerador apresentava 21 metros de diâmetro operando com potência de 132 kW a vento de 13,5 m/s; foi instalado próximo ao canal inglês de Saint-Remy-des-Landes onde operou com sucesso durante três anos, com um total de 60 dias em manutenção por problemas diversos (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994). O terceiro aerogerador operou por apenas sete meses entre 1963 e 1964. Tratava-se de um aerogerador que operava com potência de 1085 kW a vento de 16.5 m/s, apresentava três pás com um rotor de 35 m. Esses três protótipos mostraram claramente a possibilidade de se interconectar aerogeradores na rede de distribuição de energia elétrica. (DIVONE, 1994)

Durante o período entre 1955 e 1968, a Alemanha construiu e operou um aerogerador com o maior número de inovações tecnológicas na época. Os avanços tecnológicos desse modelo persistem até hoje na concepção dos modelos atuais mostrando o seu sucesso de operação. Tratava-se de um aerogerador de 34 metros de diâmetro operando com potência de 100kW, a ventos de 8m/s (HÜTTER, 1973, 1974 *apud* DIVONE, 1994). Esse aerogerador possuía rotor leve em materiais compostos, duas pás a jusante da torre, sistema de orientação amortecida por rotores laterais e torre de tubos estaiada; operou por mais de 4.000 horas entre 1957 e 1968. As pás, por serem feitas de materiais compostos, aliviaram os esforços em rolamentos diminuindo assim os problemas de fadiga. Essa inovação mostrou ser muito mais eficiente comparada aos modelos até então feitos de metais. Em 1968, quando o modelo foi desmontado e o



projeto encerrado por falta de verba, as pás do aerogerador apresentavam perfeitas condições de uso (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994).

1.2 A evolução comercial de turbinas eólicas de grande porte

O comércio das turbinas eólicas no mundo se desenvolveu rapidamente em tecnologia e tamanhos durante os últimos 15 anos. A figura 4 mostra o impressionante desenvolvimento do tamanho e da potência de turbinas eólicas desde 1985. A grande variedade de tipos e modelos disponíveis no mercado ainda não pararam de crescer. Com a demanda de novos projetos off-shore.

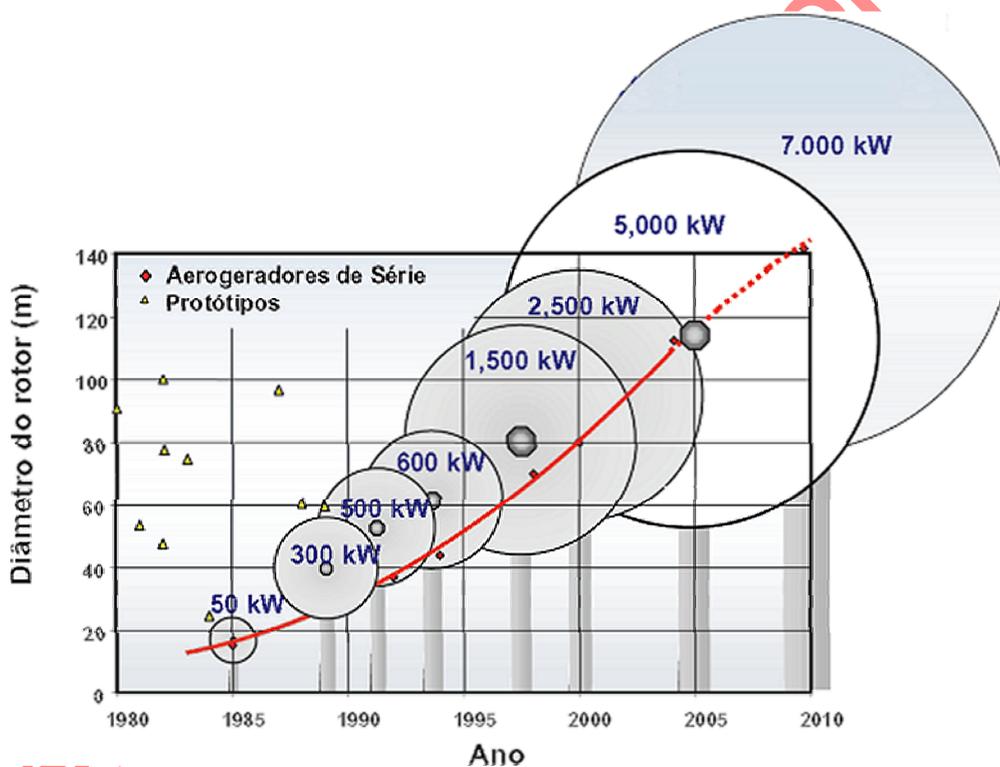


Figura 4 - Evolução das Turbinas eólicas desde 1985 até 2005 (Fonte: DEWI, 2005)

1.3 A potência eólica instalada no mundo

O perfil do crescimento da energia eólica na década de 90 indica perspectivas promissoras para o crescimento da indústria eólica mundial para as próximas décadas. Mesmo considerando-se uma desaceleração no aumento da potência instalada nos últimos anos, a procura por novos mercados e o desenvolvimento de turbinas eólicas de maior porte mostram boas perspectivas para um crescimento mais sustentável e não tão acelerado para a próxima década. A tabela 1 mostra a potencia eólica instalada em diversos países desde 1998.

Tabela 1 - Utilização internacional da energia eólica.

PAÍS	Potência acumulada ao final de cada ano [MW]										
	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
Alemanha	22.247	20.622	18.428	16.628	14.609	12.400	8.754	6.095	4.443	2.875	2.081
Estados Unidos	16.819	11.603	9.149	6.752	6.352	4.685	4.258	2.564	2.534	1.820	1.673
Espanha	15.145	11.615	10.027	8.263	6.202	4.830	3.337	2.535	1.542	834	512
Índia	7.850	6.270	4.430	2.983	2.120	1.702	1.500	1.260	1.035	992	940
China	5.912	2.604	1.260	764	566	468	404	352	262	500	166
Dinamarca	3.125	3.136	3.128	3.118	3.115	2.880	2.534	2.415	1.771	1.383	1.148
Itália	2.726	2.123	1.717	1.265	891	785	697	427	183	178	103
França	2.455	1.567	757	390	240	131	116	63	25	21	10
Reino Unido	2.389	1.963	1.353	897	704	552	483	409	347	333	319
Portugal	2.130	1.716	1.022	523	299	194	153	111	61	51	38
Canadá	1.846	1.459	683	444	326	221	198	137	125	82	25
Holanda	1.747	1.219	1.219	1.078	912	686	497	442	411	361	319
Japão	1.538	1.394	1.040	940	644	415	316	142	68	30	18
Áustria	982	965	819	607	415	139	95	77	42	30	20
Grécia	873	746	573	466	398	276	299	274	158	55	29
Austrália	817	817	572	380	198	104	71	30	9	9	11
Irlanda	805	745	496	353	225	137	125	119	73	73	53
Suécia	789	572	510	442	399	328	290	241	215	174	122
Noruega	333	314	270	160	112	97	17	13	9	9	4
Nova Zelândia	322	171	170	170	38	35	35	35	24	24	4
Egito	310	230	145	145	69	69	69	69	36	6	5
Bélgica	287	193	167	97	68	44	31	13	6	6	4
Taiwan	280	188	104	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Polónia	276	83	73	58	58	27	51	5	5	5	2
Brasil	247	237	29	29	29	24	24	22	17	17	3

PAÍS	Potência acumulada ao final de cada ano [MW]										
	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	1999	1998	1997
Turquia	207	65	20	20	20	19	19	19	9	9	-
Coréia do Sul	191	173	120	8	8	nd	nd	nd	nd	nd	2
República Tcheca	116	57	30	nd	nd						
Finlândia	110	82	82	82	47	41	39	39	18	18	12
Ucrânia	89	73	73	57	51	nd	nd	nd	nd	nd	5
México	87	87	2	nd	nd						
Costa Rica	74	74	71	71	71	71	71	51	51	27	20
Bulgária	70	36	14	nd	nd						
Irã	67	47	32	11	11	11	11	11	11	11	11
Hungria	65	61	18	nd	nd						
Marrocos	64	64	64	54	54	54	54	54	14	nd	nd
Estônia	58	33	33	nd	nd						
Lituânia	52	55	7	nd	nd						
Luxemburgo	35	35	35	35	16	16	15	15	9	9	2
Argentina	30	26	26	26	26	27	27	16	14	14	9
Outros Países	285	650	67	239	141	569	337	394	405	197	22
Total	93.850	74.169	58.834	47.555	39.434	32.037	24.927	18.449	13.932	10.153	7.692

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

2 O RECURSO EÓLICO

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais destacam-se a altura, a rugosidade, os obstáculos e o relevo.

A seguir serão descritos os mecanismos de geração dos ventos e os principais fatores de influência no regime dos ventos de uma região.

2.1 Mecanismos de Geração dos Ventos

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. A figura 5 apresenta esse mecanismo.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar” pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes e podem ser classificados em:

- Alísios: ventos que sopram dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.



- Contra-Alísios: ventos que sopram do Equador para os pólos, em altas altitudes.
- Ventos do Oeste: ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

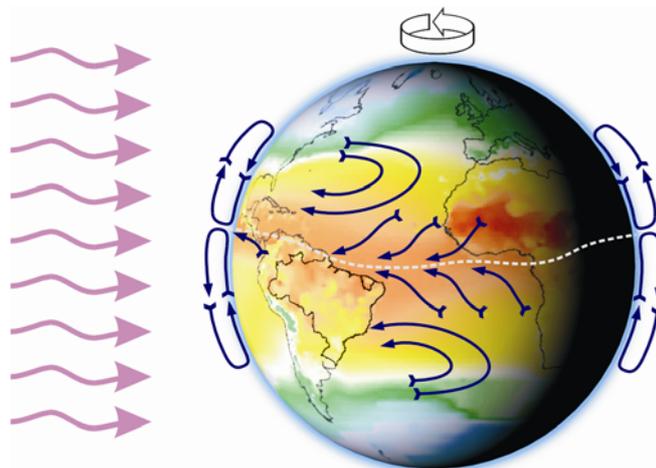


Figura 5 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

(Fonte: CEPEL, 2001)

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

As monções são ventos periódicos que mudam de direção a cada seis meses aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol inerentes à cada tipo de superfície (tais como mares e continentes) surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de refletir os raios solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar. Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é

menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima encontram-se os *ventos locais*, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados. A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu. No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales.

2.2 Fatores que influenciam o regime dos ventos

O comportamento estatístico do vento ao longo do dia é um fator que é influenciado pela variação de velocidade do vento ao longo do tempo. As características topográficas de uma região também influenciam o comportamento dos ventos uma vez que, em uma determinada área, podem ocorrer diferenças de velocidade ocasionando a redução ou aceleração na velocidade vento. Além das variações topográficas e também de rugosidade do solo, a velocidade também varia seu comportamento com a altura.

Tendo em vista que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias (algumas centenas de metros), os procedimentos para avaliar o local no qual se deseja instalar turbinas eólicas devem levar em consideração todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento. Entre os principais fatores de influência no regime dos ventos destacam-se:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar

As informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse para

avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos. O uso de imagens aéreas e dados de satélite também contribuem para uma análise mais acurada.

A figura 6 mostra, de uma forma genérica, como os ventos se comportam quando estão sob a influência das características da superfície do solo.

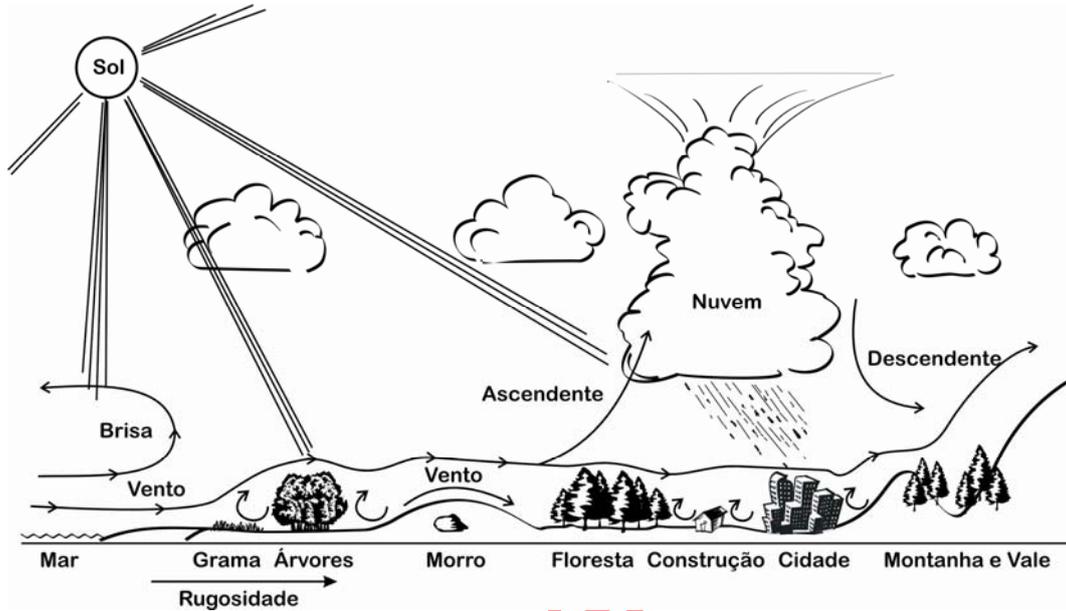


Figura 6 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno
(Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998)

WWW.RENOVAVELIS

3 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

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

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3.1)$$

Considerando a mesma massa de ar m em movimento a uma velocidade v , perpendicular a uma sessão transversal de um cilindro imaginário (figura 7), pode-se demonstrar que a potência disponível do vento que passa pela seção A, transversal ao fluxo de ar é dada por:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (3.2)$$

Onde:

P = potência do vento [W]

ρ = massa específica do ar [kg/m³]

A = área da seção transversal [m²]

v = velocidade do vento [m/s]

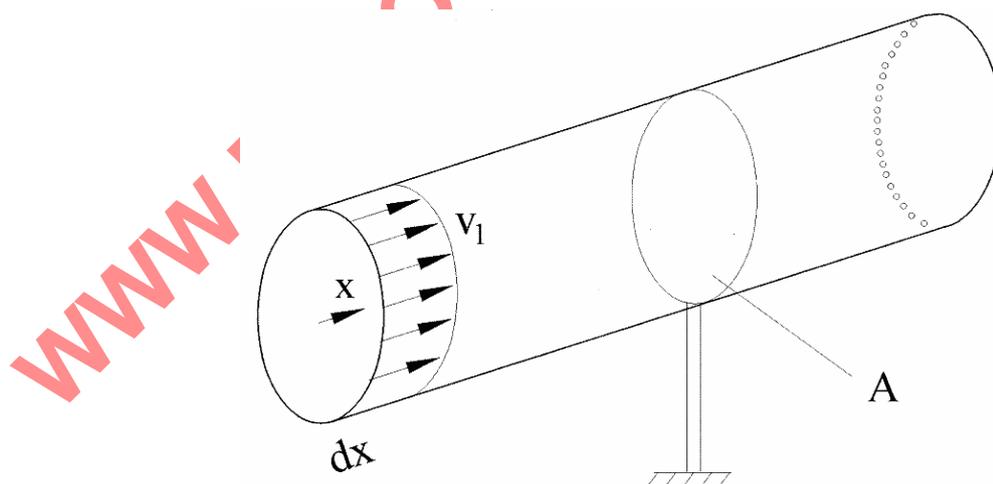


Figura 7 - Fluxo de ar através de uma área transversal A

A expressão 3.2 também pode ser escrita por unidade de área definindo, desta forma, a densidade de potência DP, ou fluxo de potência:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3.3)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível pelo vento não pode ser totalmente aproveitada pela turbina eólica na conversão de energia elétrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência c_p , que pode ser definido como a fração da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor.

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento (c_p máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde v_1 representa a velocidade do vento na região anterior às pás, v_2 a velocidade do vento no nível das pás e v_3 a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 8.

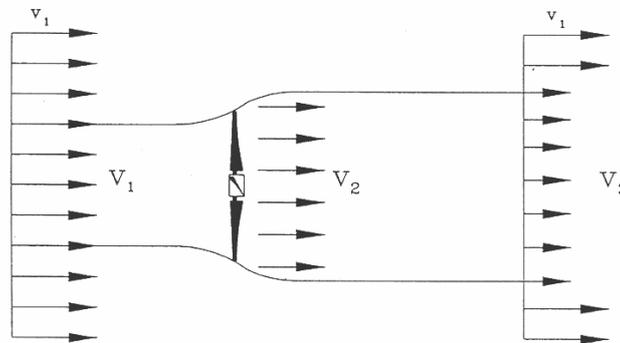


Figura 8 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.

Como na figura 8 acima, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade v_1 que é retardada pelo conjunto de pás assumindo uma velocidade v_3 a jusante das pás. Pela lei da continuidade temos que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (3.4)$$

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

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m(v_1^2 - v_3^2) \quad (3.5)$$

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

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \dot{m}(v_1^2 - v_3^2) \quad (3.6)$$

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

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

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

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (3.7)$$

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

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (3.8)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 3.7 e a velocidade v_2 apresentada na equação 3.8 forem inseridas na mesma equação 3.6, tem-se:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.9)$$

Onde:

- Potência do Vento = $\frac{1}{2} \rho A v_1^3$
- Coeficiente de Potência $c_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$

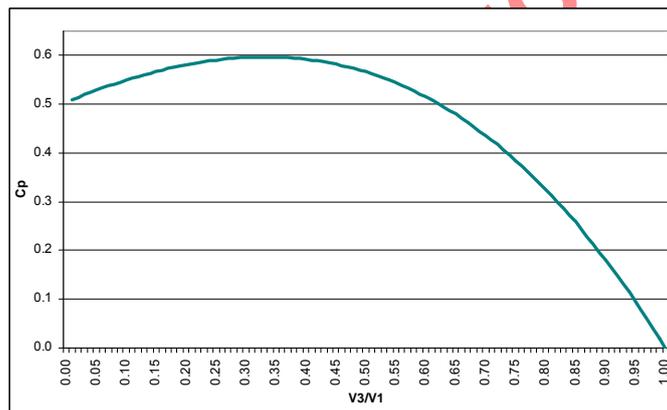


Figura 9 – Distribuição de c_p em função de v_3/v_1

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

$$Cp_{Betz} = \frac{16}{27} = 0,59 \text{ onde } v_3/v_1 = 1/3$$

A figura 10 mostra as principais forças atuantes em uma pá da turbina eólica, assim como os ângulos de ataque (α) e de passo (β). A força de sustentação é perpendicular ao fluxo do vento resultante visto pela pá (V_{res}), resultado da subtração vetorial da velocidade

do vento incidente (V_w) com a velocidade tangencial da pá da turbina eólica (V_{tan}), conforme a equação (3.10).

$$\vec{V}_{res} = \vec{V}_w - \vec{V}_{tan} \quad (3.10)$$

A força de arrasto é produzida na mesma direção de V_{res} . A resultante das componentes da força de sustentação e de arrasto na direção V_{tan} , produz o torque da turbina eólica.

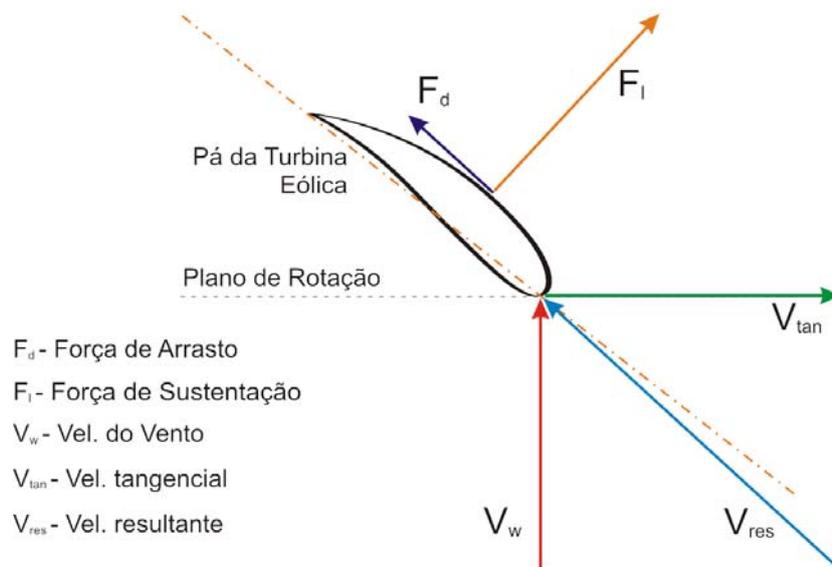


Figura 10 – Principais forças atuantes em uma pá de turbina elétrica
(Fonte: Montezano, 2008)

A potência mecânica extraída do vento pela turbina eólica depende de vários fatores. Mas tratando-se de estudos elétricos o modelo geralmente apresentado nas literaturas é simplificado pelas equações (3.11) e (3.12). (PAVINATTO, 2005)

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 c_p(\lambda, \beta) \quad (3.11)$$

Com:

$$\lambda = \left(\frac{R \omega_{wt}}{v_w} \right) \quad (3.12)$$

Onde:

- c_p – coeficiente de potência da turbina eólica;
- λ – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*);
- ω_{wt} – velocidade angular da turbina eólica (rad/s);
- R – raio da turbina eólica (m);
- ρ – densidade do ar (Kg/m^3);
- A – área varrida pelo rotor da turbina eólica (m^2);
- v_w – velocidade do vento incidente na turbina eólica (m/s);

Na equação (3.11), o coeficiente de potência $c_p(\lambda, \beta)$ depende das características da turbina eólica, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo das pás da turbina eólica (pitch) β . O $c_p(\lambda, \beta)$ é expresso como uma característica bidimensional.

Aproximações numéricas normalmente são desenvolvidas para o cálculo de c_p para valores dados de λ e β (RAIAMBAL e CHELLAMUTH, 2002 *apud* PAVINATTO, 2005). A figura 11 mostra a característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçada para vários valores de β .

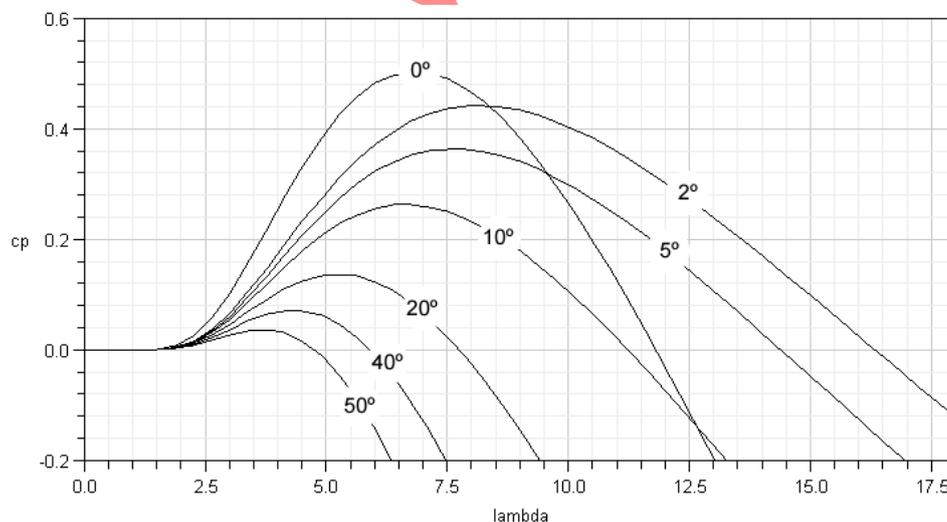


Figura 11 – Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas (Fonte: Montezano, 2008)

4 TIPOS DE TURBINAS EÓLICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4.1 Rotores de Eixo Vertical

Em geral, os rotores de eixo vertical tem a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devidos as forças de *Coriolis*. Os rotores de eixo vertical também podem ser movidos por forças de sustentação (*lift*) e por forças de arrasto (*drag*). Os principais tipos de rotores de eixo vertical são *Darrieus*, *Savonius* e turbinas com torre de vórtices. Os rotores do tipo *Darrieus* são movidos por forças de sustentação e constituem-se de lâminas curvas (duas ou três) de perfil aerodinâmico, atadas pelas duas pontas ao eixo vertical.



Figura 12 - Turbina experimental de eixo vertical (SANDIA, 2006)

4.2 Rotores de Eixo Horizontal

Os rotores de eixo horizontal são os mais comuns e grande parte da experiência mundial está voltada para a sua utilização. São movidos por forças aerodinâmicas chamadas de forças de sustentação (*lift*) e forças de arrasto (*drag*). Um corpo que obstrui

o movimento do vento sofre a ação de forças que atuam perpendicularmente ao escoamento (forças de sustentação) e de forças que atuam na direção do escoamento (forças de arrasto). Ambas são proporcionais ao quadrado da velocidade relativa do vento. Adicionalmente as forças de sustentação dependem da geometria do corpo e do ângulo de ataque (formado entre a velocidade relativa do vento e o eixo do corpo).

Os rotores que giram predominantemente sob o efeito de forças de sustentação permitem liberar muito mais potência do que aqueles que giram sob efeito de forças de arrasto, para uma mesma velocidade de vento.

Os rotores de eixo horizontal ao longo do vento (aerogeradores convencionais) são predominantemente movidos por forças de sustentação e devem possuir mecanismos capazes de permitir que o disco varrido pelas pás esteja sempre em posição perpendicular ao vento. Tais rotores podem ser constituídos de uma pá e contrapeso, duas pás, três pás ou múltiplas pás (*multivane fans*). Construtivamente, as pás podem ter as mais variadas formas e empregar os mais variados materiais. Em geral, utilizam-se pás rígidas de madeira, alumínio ou fibra de vidro reforçada.



Figura 13 - Turbina de eixo horizontal

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*down wind*) ou a montante do vento (*up wind*). No primeiro caso, a “sombra” da torre provoca vibrações nas pás. No segundo caso, a “sombra” das pás

provoca esforços vibratórios na torre. Sistemas a montante do vento necessitam de mecanismos de orientação do rotor com o fluxo de vento, enquanto nos sistemas a jusante do vento, a orientação realiza-se automaticamente.

Os rotores mais utilizados para geração de energia elétrica são os de eixo horizontal do tipo hélice, normalmente compostos de 3 pás ou em alguns casos (velocidades médias muito altas e possibilidade de geração de maior ruído acústico) 1 ou 2 pás.

4.2.1 Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal

As principais configurações de uma turbina eólica de eixo horizontal podem ser vistas na figura 14. Estas turbinas são diferenciadas pelo tamanho e formato da nacelle, a presença ou não de uma caixa multiplicadora e o tipo de gerador utilizado (convencional ou multipolos). A seguir são apresentados os principais componentes da turbina que, de uma forma geral pode ser apresentados como a torre, a nacelle e o rotor.

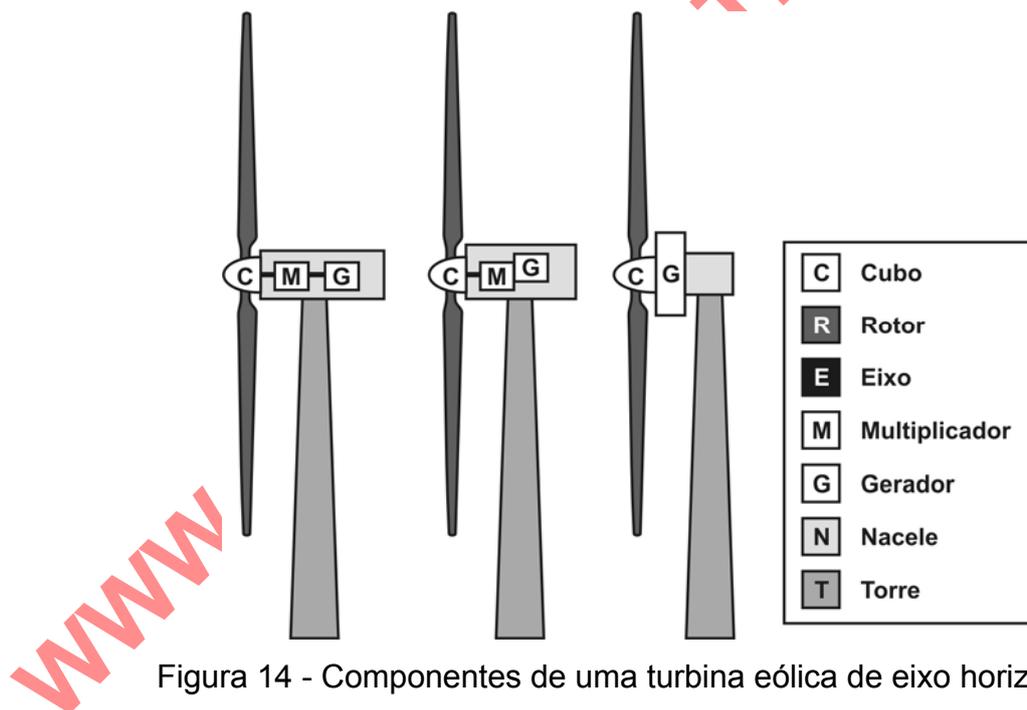


Figura 14 - Componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal

4.2.1.1 Nacele

É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada) e todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para melhor posicionamento do vento. A figura 15 e 16 mostram os principais componentes instalados em dois tipos de naceles, uma delas utilizando um gerador convencional e outra utilizando um gerador multipolos.

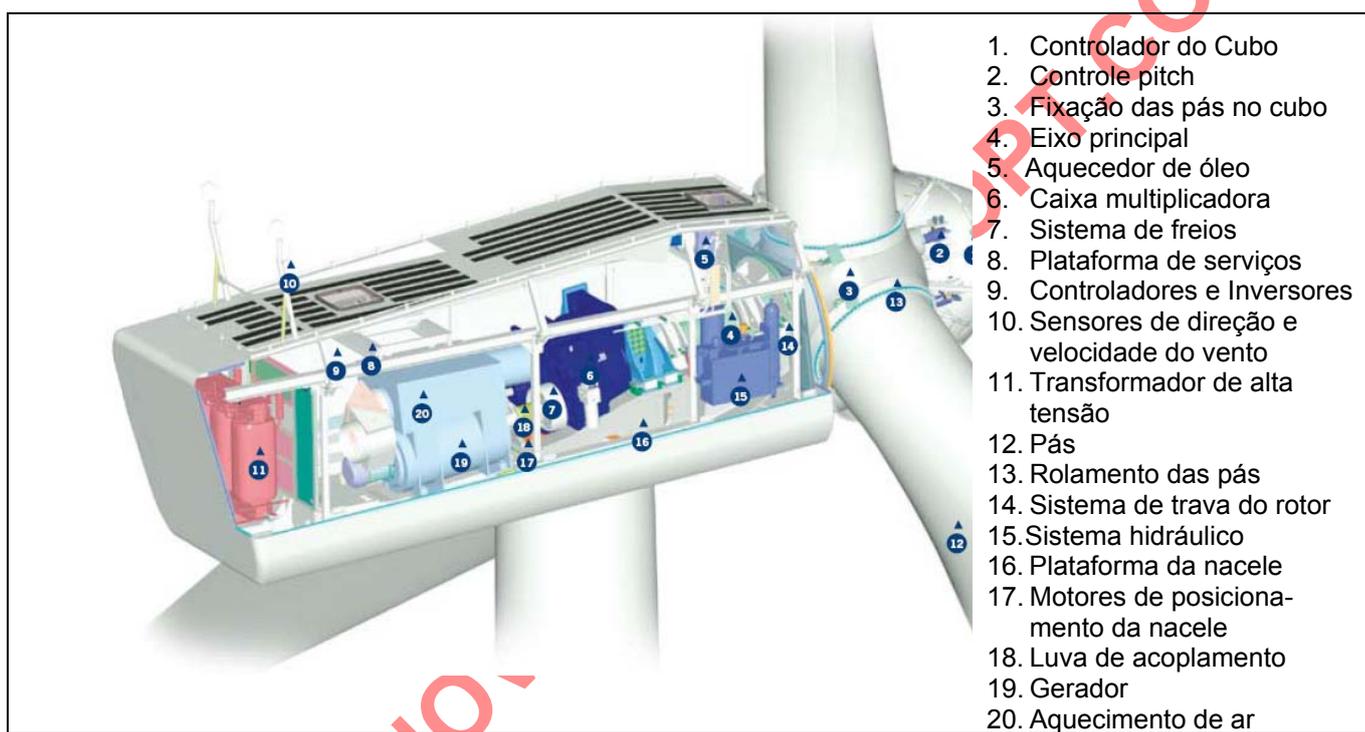


Figura 15 – Vista do interior da nacela de uma turbina eólica utilizando um gerador convencional (Fonte: VESTAS,2006)

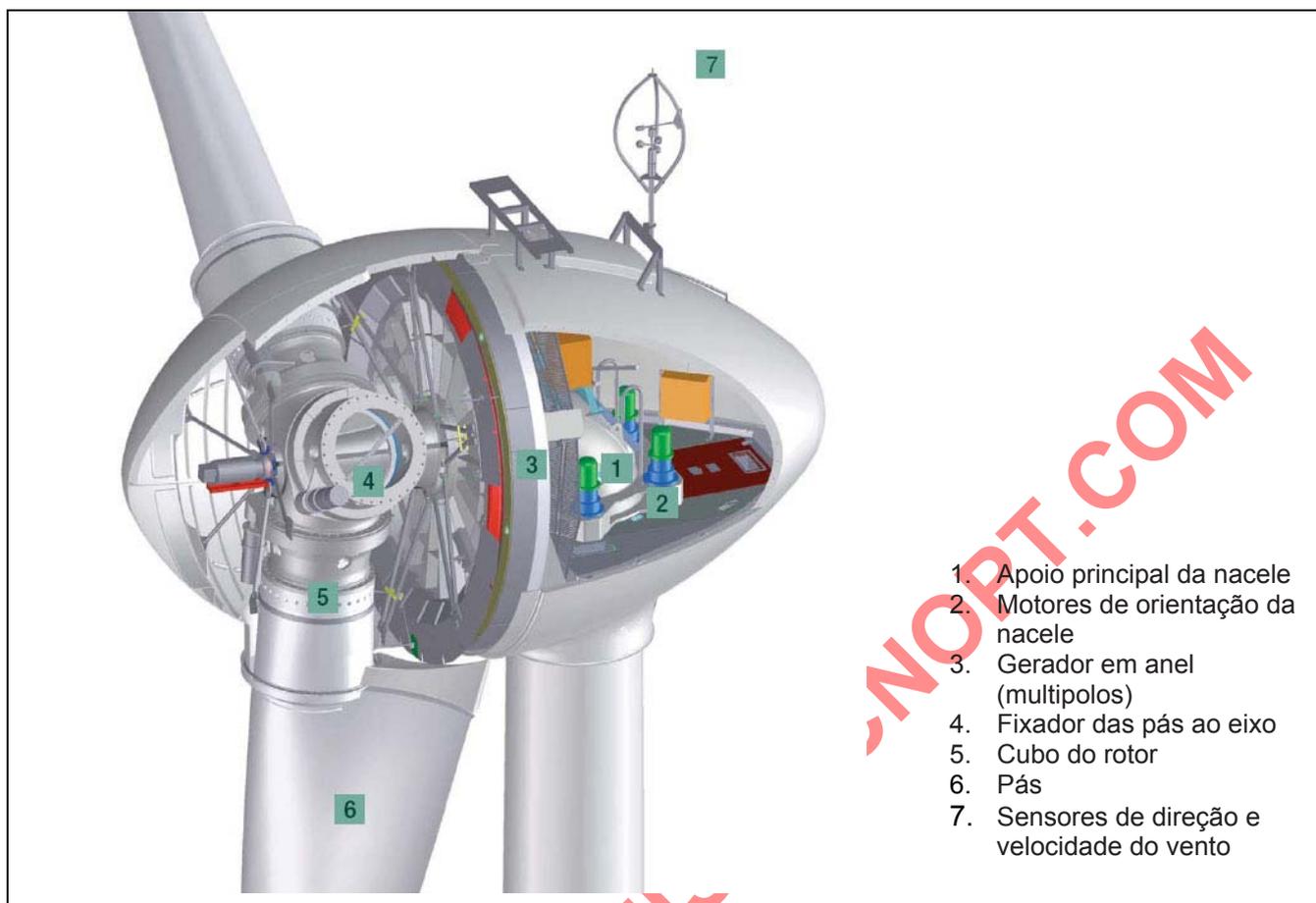


Figura 16 – Vista do interior da nacela de uma turbina eólica utilizando um gerador multipolos (Fonte: ENERCON, 2006)

4.2.1.2 Pás, cubo e eixo

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico. Inicialmente fabricadas com alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epoxi. Nas turbinas que usam controle de velocidade por passo, a pá dispõe de rolamentos em sua base para que possa girar modificando assim seu ângulo de ataque.

As pás são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica a frente da turbina denominada cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para as turbinas que utilizem o controle de velocidade por passo, o cubo além de apresentar os rolamentos para fixação das pás também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás. É importante citar que por se tratar de uma

peça mecânica de alta resistência, o cubo é montado de tal forma que ao sair da fábrica este apresenta-se como peça única e compacta viabilizando que, mesmo para os grandes aerogeradores, seu transporte seja feito sem a necessidade de montagens no local da instalação.

O eixo é o responsável pelo acoplamento do cubo ao gerador fazendo a transferência da energia mecânica da turbina. É construído em aço ou liga metálica de alta resistência.

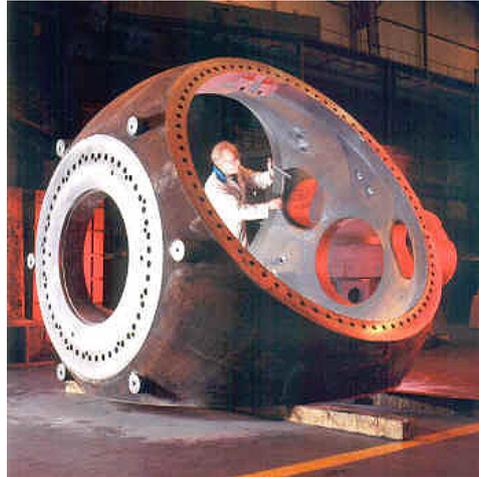


Figura 17 – Detalhe de um cubo para conexão de pás (TAYLOR, 2008).

4.2.1.3 Transmissão e Caixa Multiplicadora

A transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos. A figura 14 apresenta a localização da caixa multiplicadora dentro do sistema de geração eólica.

O projeto tradicional de uma turbina eólica consiste em colocar a caixa de transmissão mecânica entre o rotor e o gerador de forma a adaptar a baixa velocidade do rotor à velocidade de rotação mais elevada dos geradores convencionais.

A velocidade angular dos rotores geralmente varia na faixa de 20 a 150 RPM, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham a rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1200 a 1800 RPM), tornando necessário a instalação de um sistema de multiplicação entre os eixos.

Mais recentemente, alguns fabricantes desenvolveram com sucesso aerogeradores sem a caixa multiplicadora e abandonaram a forma tradicional de construir turbinas eólicas. Assim, ao invés de utilizar a caixa de engrenagens com alta relação de transmissão, necessária para alcançar a elevada rotação dos geradores, utilizam-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

Os dois tipos de projetos possuem suas vantagens e desvantagens e a decisão em usar o multiplicador ou fabricar um aerogerador sem caixa de transmissão é antes de tudo uma questão de filosofia do fabricante.



Figura 18 - Gerador conectado a caixa de engrenagens (vista a direita)

4.2.1.4 Gerador

A transformação da energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletro-mecânica é um problema tecnologicamente dominado e, portanto, encontram-se vários fabricantes de geradores disponíveis no mercado.

Entretanto, a integração de geradores no sistemas de conversão eólica constitui-se em um grande problema, que envolve principalmente:

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (uma vez que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo);
- exigência de frequência e tensão constante na energia final produzida;

- facilidade de instalação, operação e manutenção devido ao isolamento geográfico de tais sistemas, sobretudo em caso de pequena escala de produção (isto é, necessitam ter alta confiabilidade).

Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação a sistemas de conversão de energia eólica.

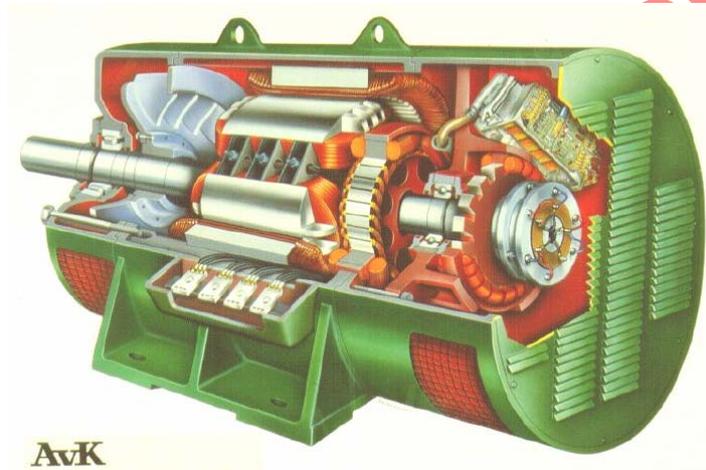


Figura 19 - Gerador convencional



Figura 20 - Gerador multi polos

4.2.1.5 Torre

As torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Inicialmente, as turbinas utilizavam torres de metal treliçado. Com o uso de geradores com potências cada vez maiores, as naceles passaram a sustentar um peso muito elevado tanto do gerador quanto das pás. Desta forma, para dar maior mobilidade e segurança para sustentar todo a nacela em alturas cada vez maiores, tem-se utilizado torres de metal tubular ou de concreto que podem ser sustentadas ou não por cabos tensores.

4.3 Mecanismo de Controle

Os mecanismos de controle destinam-se à orientação do rotor, ao controle de velocidade, ao controle de carga, etc. Pela variedade de controles, existe uma enorme variedade de mecanismos que podem ser mecânicos (velocidade, passo, freio), aerodinâmicos (posicionamento do rotor) ou eletrônicos (controle da carga).

Os modernos aerogeradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência à potência nominal do aerogerador. São chamados de controle estol (*Stall*) e controle de passo (*Pitch*). No passado, a maioria dos aerogeradores usavam o controle estol simples; atualmente, entretanto, com o aumento do tamanho das máquinas, os fabricantes estão optando pelo sistema de controle de passo que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas.

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá, reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto. Sob todas as condições de ventos, superiores à velocidade nominal, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos parcialmente, descolado da superfície produzindo menores forças de sustentação e elevadas forças de arrasto.



Menores sustentações e maiores arrastos atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.

O controle de passo, por sua vez, é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do controlador do sistema. Sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um aumento da velocidade do vento, as pás do rotor giram em torno do seu eixo longitudinal; em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência. Para todas as velocidades do vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto.

4.3.1 Controle de Passo

O controle de passo é um sistema de controle ativo, que normalmente necessita de um sinal do gerador de potência. Sempre quando a potência nominal do gerador for ultrapassada, devido ao aumento das velocidades do vento, as pás do rotor serão giradas em torno de seu eixo longitudinal, ou em outras palavras, mudam seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque do fluxo de ar. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência do vento pela turbina. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, que é a mínima que se necessita para gerar a potência nominal, o ângulo é escolhido de tal maneira que a turbina produza apenas a potência nominal.

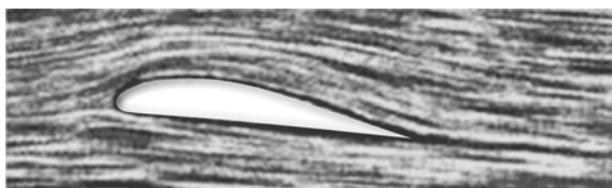


Figura 21 - Fluxo aderente ao perfil

Sob todas as condições de vento, o fluxo em torno dos perfis da pá do rotor é bem aderente à superfície (Figura 21), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica a pequenas forças de arrasto. Turbinas com controle de passo são mais sofisticadas do que as de passo fixo, controladas por estol porque estas necessitam de um sistema de variação de passo. Por outro lado, elas possuem certas vantagens:

- permitem controle de potência ativo sob todas as condições de vento, também sob potências parciais
- alcançam a potência nominal mesmo sob condições de baixa massa específica do ar (grandes altitudes dos sítios, altas temperaturas)
- maior produção de energia sob as mesmas condições (sem diminuição da eficiência na adaptação ao estol da pá)
- partida simples do rotor pela mudança do passo
- fortes freios desnecessários para paradas de emergência do rotor
- cargas das pás do rotor decrescentes com ventos aumentando acima da potência nominal
- posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em ventos extremos
- massas das pás do rotor menores levam a massas menores dos aerogeradores

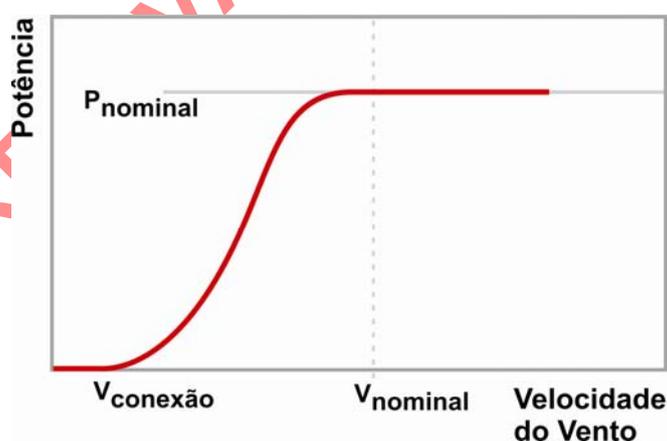


Figura 22 - Forma típica de uma curva de potência de um aerogerador com controle de passo

4.3.2 Controle Estol

O controle de estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem ser giradas em torno de seu eixo longitudinal. O seu ângulo de passo é escolhido de tal maneira que para velocidades de ventos maiores que a nominal o fluxo em torno do perfil pá do rotor descola da superfície da pá (estol) (Figura 23). Isto reduz as forças atuantes de sustentação e aumentam a de arrasto. Menores sustentações e maiores arrastos rotacionais atuam contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, uma situação que drasticamente reduziria a potência do rotor, as pás possuem uma certa torção longitudinal que a leva a um suave desenvolvimento do estol.

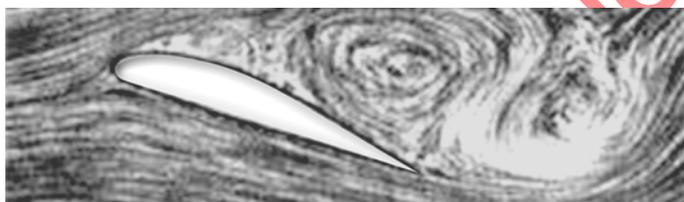


Figura 23 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil

Sob todas as condições de ventos superiores à velocidade nominal o fluxo em torno dos perfis das pás do rotor é, pelo menos, parcialmente descolado da superfície (Figura 23), produzindo, portanto sustentações menores e forças de arrasto muito mais elevadas. Turbinas com controle estol são mais simples do que as de controle de passo porque elas não necessitam de um sistema de mudança de passo. Em comparação com os aerogeradores com controle de passo, eles possuem, em princípio, as seguintes vantagens:

- inexistência de sistema de controle de passo
- estrutura de cubo do rotor simples
- menor manutenção devido a um número menor de peças móveis
- auto-confiabilidade do controle de potência

Em termos mundiais, o conceito de controle através de estol domina. A maioria dos fabricantes utiliza esta possibilidade simples de controle de potência, que sempre necessita uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede.

Apenas nos dois últimos anos uma mistura de controle por estol e de passo apareceu, o conhecido “estol ativo”. Neste caso, o passo da pá do rotor é girado na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação) como é feito em sistema de passo normais. As vantagens deste sistema são:

- são necessárias pequeníssimas mudanças no ângulo do passo
- possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (ventos baixos)
- a posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de ventos extremos.

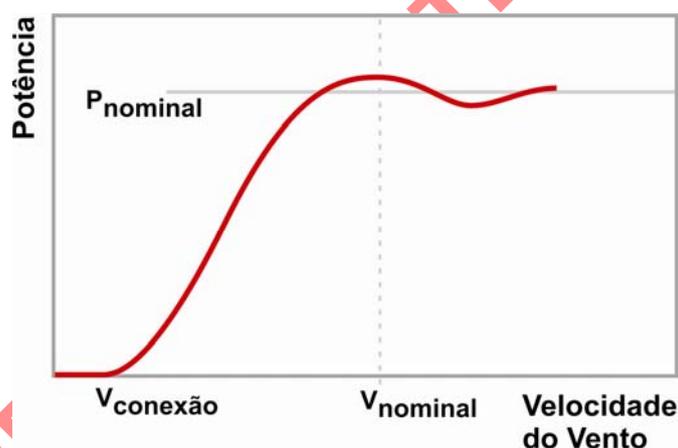


Figura 24 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle tipo estol.

5 SISTEMA ELÉTRICO DE UM AEROGERADOR E QUALIDADE DE ENERGIA

5.1 Aerogeradores com velocidade constante

Nos aerogeradores com velocidade constante, o gerador é diretamente conectado à rede elétrica. A frequência da rede determina a rotação do gerador e, portanto, a da turbina. A baixa rotação da turbina n_t é transmitida ao gerador, de rotação n_g por um multiplicador com relação de transmissão r . A velocidade do gerador depende do número de polos p e da frequência do sistema elétrico f dados por:

$$n_t = \frac{n_g}{r} \quad n_g = \frac{f}{p} \quad n_t = \frac{f}{r.p} \quad (5.1)$$

A figura 25 mostra um esquema elétrico de um aerogerador com velocidade constante. Estas máquinas usam geradores elétricos assíncronos, ou de indução, cuja maior vantagem é sua construção simples e barata, além de dispensarem dispositivos de sincronismo. As desvantagens destes geradores são as altas correntes de partida e sua demanda por potência reativa. As altas correntes de partida são suavizadas por um tiristor de corrente, ou de partida

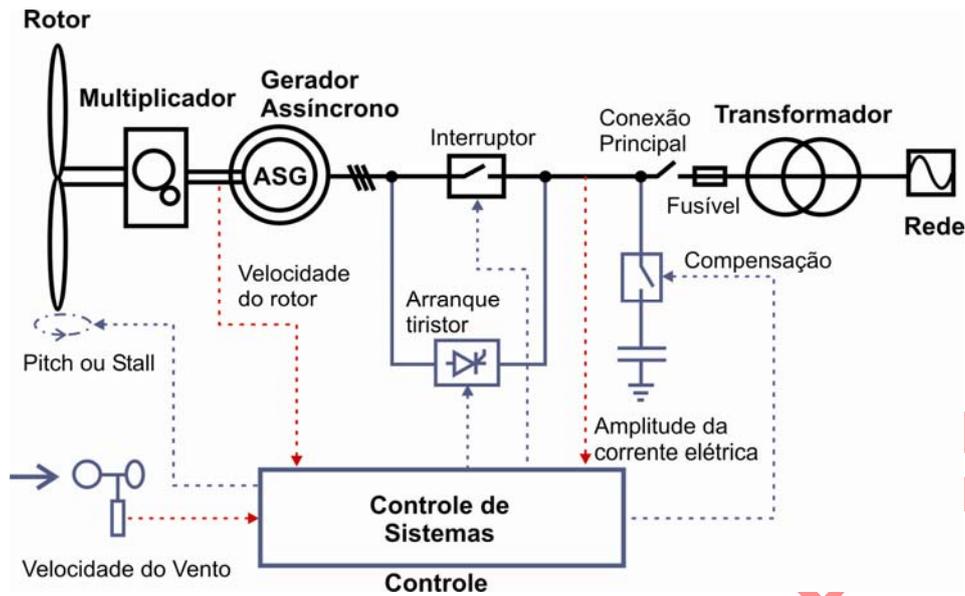


Figura 25 – Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante (DEWI, 2005)

5.2 Aero geradores com velocidade variável

Os aerogeradores com velocidade variável podem usar geradores síncronos ou assíncronos como mostra a figura 26.

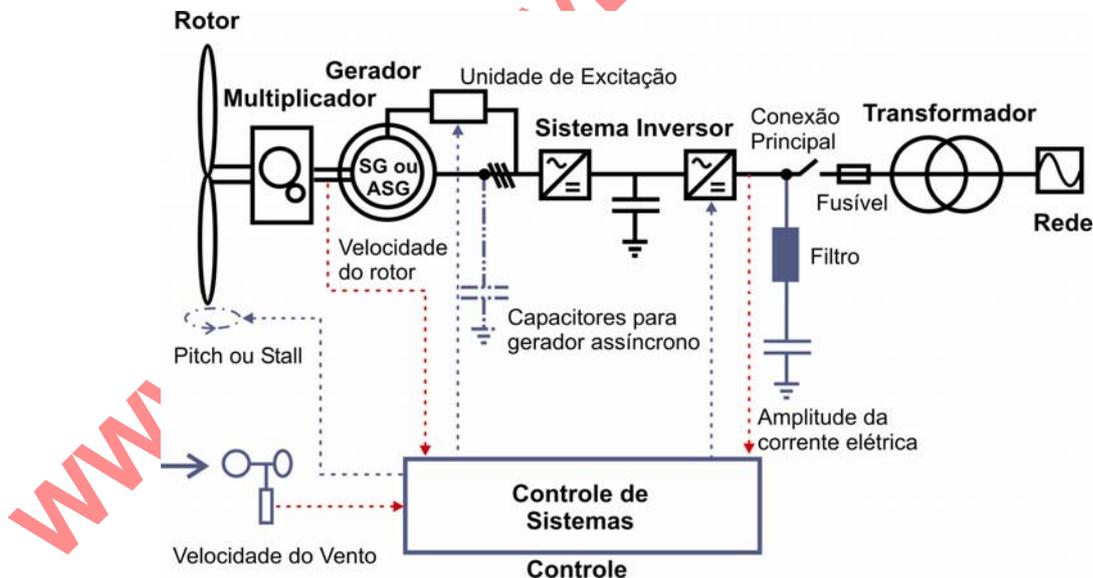


Figura 26 – Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa uma conversora de frequência para o controle da frequência da geração elétrica (DEWI, 2005)

A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de uma conversora de frequência eletrônica, formada por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, como controle da frequência de saída sendo feito eletronicamente através dos tiristores. Como a frequência produzida pelo gerador depende de sua rotação, esta será variável em função da variação da rotação da turbina eólica. Entretanto, por meio da conversora, a frequência da energia elétrica fornecida pelo aerogerador será constante e sincronizada com o sistema elétrico.

Quando são usados geradores assíncronos, ou de indução, é necessário prover energia reativa para a excitação do gerador, que pode ser feita por auto-excitação usando-se capacitores adequadamente dimensionados, de forma similar ao caso do aerogerador com velocidade constante. Neste caso, deve-se observar que os capacitores seja conectados antes do retificador, uma vez que a conversora de frequência faz isolamento galvânico no sistema, não permitindo a absorção de energia reativa externa, seja do sistema elétrico ou de capacitores. (CUSTODIO, 2002)

Outra alternativa é o uso de geradores assíncronos duplamente alimentado, isto é, com dois enrolamentos que apresentam velocidades síncronas diferentes. O uso de enrolamento rotórico associado a uma resistência variável, em série, permite o controle da velocidade do gerador pela variação do escorregamento, mantendo a frequência elétrica do gerador no valor definido pelo sistema elétrico ao qual o aerogerador está conectado.

A idéia básica do aerogerador com velocidade variável é o desacoplamento da velocidade de rotação e, conseqüentemente, do rotor da turbina, da frequência elétrica da rede. O rotor pode funcionar com velocidade variável ajustada à situação real da velocidade do vento, garantindo um desempenho aerodinâmico maximizado. Uma vantagem é a redução das flutuações de carga mecânica. As desvantagens são os altos esforços de construção e a geração de harmônicos, associados à conversora de frequência, que podem ser reduzido significativamente com o custo de filtros que, por sua vez, aumentam os custos. (CUSTODIO, 2002)

5.3 Qualidade da energia

A qualidade de energia no contexto da geração eólica descreve o desempenho elétrico do sistema de geração de eletricidade da turbina eólica onde qualquer



perturbações sobre a rede elétrica devem ser mantidos dentro de limites técnicos confederando o nível de exigência imposto pelo gerente de operações da rede.

Para a maior parte das aplicações de unidades eólicas, a rede pode ser considerada como um componente capaz de absorver toda a potência gerada por estas unidades com tensão e frequência constantes. No caso, por exemplo de sistemas isolados de pequeno porte, pode ser encontradas situações onde a potência elétrica fornecida pela turbina eólica alcance valores compatíveis com a capacidade da rede. Problemas também podem ocorrer onde a rede é fraca¹, onde, neste caso a qualidade da energia deve ser uma das principais questões a serem observadas sobre a utilização de turbinas eólicas (tamanho, tipo de controle, etc.)

A tabela 2 descreve os principais distúrbios causados por turbinas eólicas na rede elétrica e as respectivas causas que podem ser resumidas em condições meteorológicas, do terreno, e especificamente sobre as características elétricas, aerodinâmicas, mecânicas e de controle presente na turbina eólica (GERDES, 1997)

Tabela 2 – Distúrbios causados por turbinas eólicas à rede elétrica

Distúrbios	Causa
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Elevação / queda de tensão 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Valor médio da potência entregue
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flutuações de tensão e cintilação 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Operações de chaveamento ▪ Efeito de sombreamento da torre ▪ Erro de passo da pá ▪ Erro de mudança de direção ▪ Distribuição vertical do vento, ▪ Flutuações a velocidade do vento ▪ Intensidade de turbulências
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Harmônicos 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conversores de frequência

¹ O conceito de rede “fraca” ou “forte” está intimamente ligado a potência de curto circuito da rede. Uma rede é dita “fraca” quando no ponto de interligação a relação entre a potência de curto circuito da rede e a potência eólico-elétrica injetada na rede é pequena. Se a relação é grande, a rede é dita ser forte ou robusta, sendo capaz de absorver as perturbações elétricas; a rede comporta-se semelhante a um barramento infinito (CARVALHO, 2003)

Distúrbios	Causa
	<ul style="list-style-type: none">▪ Controladores tiristorizados▪ Capacitores
<ul style="list-style-type: none">▪ Consumo de potência reativa	<ul style="list-style-type: none">▪ Componentes indutivos ou sistemas de geração

(Fonte: CARVALHO,2003)

É importante observar que os cuidados devido à conexão à rede elétrica devem ser observados e avaliados ainda na fase de planejamento. Quando um determinado número de máquinas eólicas são conectadas em um parque, o nível de potência entregue por unidade por variar devido a localização das máquinas no parque e o efeito de “sombra” causado pelas turbinas a montante àquelas que encontram-se em fileiras mais afastadas em relação a direção do vento predominante.

O tipo de gerador utilizado (síncrono ou assíncrono) produz diferentes níveis de flutuação nas variáveis elétricas de saída. Isto pode ser verificado particularmente para as unidades de grande porte, com potência superiores a 1 MW, visto que as de pequeno e médio porte podem influenciar a rede apenas quando estão conectadas em grande número. Devido aos baixos valores de escorregamento, geradores assíncronos conectados diretamente na rede elétrica operando com velocidade quase constante geram flutuações mais significativas do que geradores síncronos em velocidade variável, conectados a rede via unidade retificadora/inversora.(CARVALHO,2003)

No caso específico de distribuições de harmônicos, considerado como um grave problema para a manutenção da qualidade de energia, a principal fonte de harmônicos são os conversores de frequência empregados para conectar os geradores eólicos a rede elétrica. Assim, os geradores eólicos assíncronos ou síncronos ligados diretamente à rede elétrica não necessitam de maiores atenções neste aspecto.

6 APLICAÇÕES DOS SISTEMAS EÓLICOS

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas: sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados caso, de uma unidade de armazenamento.



Figura 27 - Considerações sobre o tamanho das turbinas eólicas e suas principais aplicações

6.1 Sistemas Isolados

Os sistemas isolados, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias, com o objetivo de utilizar aparelhos elétricos ou na forma de energia gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é diretamente consumida.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O *controlador de carga* tem como principal objetivo não deixar que haja danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda. O controlador de carga é usado em sistemas de pequeno porte nos quais os aparelhos utilizados são de baixa tensão e corrente contínua (CC).

Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário a utilização de um *inversor*. Este dispositivo geralmente incorpora um *seguidor do ponto de máxima potência* necessário para otimização da potência produzida. Este sistema é usado quando se deseja mais conforto com a utilização de eletrodomésticos convencionais.

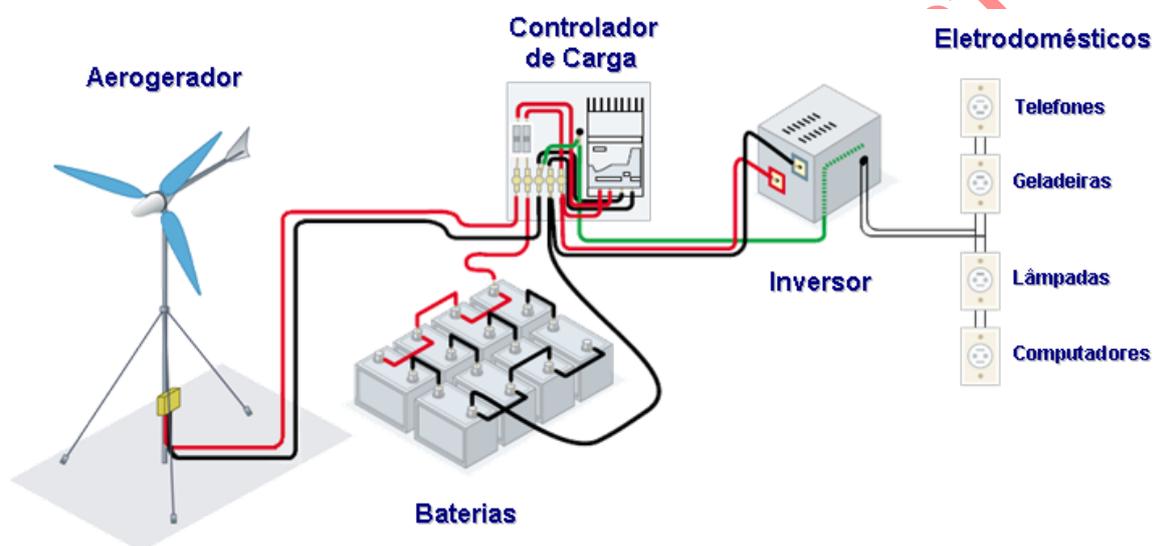


Figura 28 - Configuração de um sistema eólico isolado

6.2 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em

corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso.



Figura 29 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel

6.3 Sistemas Interligados à Rede

Os sistemas interligados à rede utilizam um grande número de aerogeradores e não necessitam de sistemas de armazenamento de energia pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. O total de potência instalada no mundo de sistemas eólicos interligados à rede somam aproximadamente 60 GW (WWEA, 2006) dos quais 75% estão instalados na Europa.



Figura 30 – Parque eólico conectado à rede – Parque Eólico da Prainha - CE

6.4 Sistemas Off-Shore

As instalações off-shore representa a nova fronteira da utilização da energia eólica. Embora representam instalações de maior custo de transporte, instalação e manutenção, as instalações off-shore tem crescido a cada ano principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra. Este esgotamento é apresentado principalmente pela grande concentração de parques eólicos nestas áreas e pelas restrições ambientais rigorosas sobre a utilização do solo.

A indústria eólica tem investido no desenvolvimento tecnológico da adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Além do desenvolvimento tecnológico, os projetos off-shore necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, sua instalação e operação. Todo o projeto deve ser coordenado de forma a utilizarem os períodos onde as condições marítimas propiciem um deslocamento e uma instalação com segurança.



Figura 31 – Parque eólico instalado no mar do norte (Fonte: BRITSC, 2005)

WWW.RENOVAVEIS.TECNOPT.COM

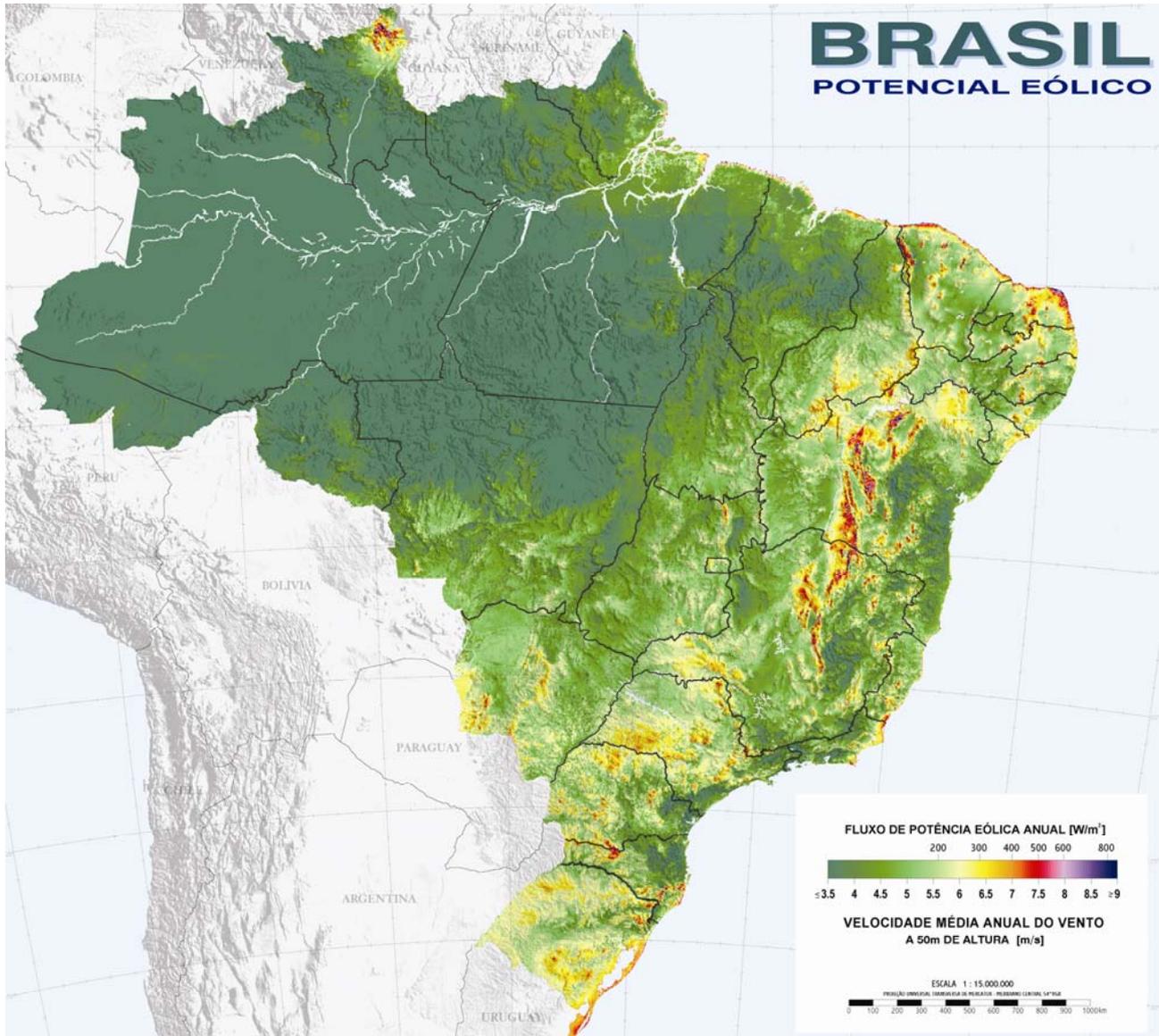
7 BIBLIOGRAFIA

- BEURSKENS, J., 2000, "Going to sea – Wind goes offshore", *Renewable Energy World*, v. 3, n. 1 pp. 19-29.
- BUNNEFILLE, R., 1974, "French Contribution to Wind Power Development – by EDF 1958 – 1966", *Proceedings, Advanced Wind Energy Systems*, Vol. 1 (published 1976), O.Ljungström, ed., Stockholm: Swedish Board of Technical Development and Swedish State Power Board, pp 1-17 to 1-22 *apud* DIVONE, 1994 Op. cit.
- CARVALHO, P. 2003. Geração Eólica. ISBN 85-7485-039-X. Imprensa Universitária, Fortaleza, CE.
- CEPEL, 2001. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. Ed. CEPEL, Rio de Janeiro, RJ.
- CHESF-BRASCEP, 1987. *Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/Tecnologia. Energia Eólica. V.1 De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento*, Rio de Janeiro.
- CUSTÓDIO, R.S., 2002. *Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas e Aplicação Específica no Rio Grande do Sul*. Tese de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS Fac. de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica.
- DIVONE, L.V., 1994, "Evolution of Modern Wind Turbines". In *Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, pp 73-138.
- Dutra, R.M., 2001. *Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro*. Dissertação de M.Sc., Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 300 pp.
- ELDRIDGE, F.R., 1980 *Wind Machines*, 2 ed., Van Nostrand, New York, *apud* CHESF-BRASCEP, 1987. Op. cit.
- ELETROBRÁS-SCIENTIA, 1977, *Sistemas de Conversão de Energia Eólica*, Rio de Janeiro.
- ESSLEMONT, E., MOCCORMICK, M, 1996, "Sociological Impact of a Wind Farm Development". In: JAMES, JAMES. *The World Directory of Renewable Energy: Suppliers and Services*, London.
- EWEA, EUROPEAN COMMISSION, 1998a, "Technology". In: *Wind Energy – The Facts*, Vol 1.
- GERDES, G., SANTJER, F., KLOSSE, R., 1997. Overview and Development of Procedures on Power Quality Measurements of Wind Turbine. 1997 European Wind Energy Conference, 1997.
- GIPE, P. 1995, *Wind Energy - Comes of Age*. New York, John Wiley & Sons Inc.
- GIPE, P., 1993 *Wind Power for Home & business: Renewable Energy for the 1990s and Beyond*. 1 ed. Vermont, Chelsea Green.

- GRUBB, M. e MEYER, I.N., 1994, "Wind Energy: Resources, Systems, and Regional Strategies", *Renewable Energy Sources for Fuels and Electricity* Cap. 4, Island Press, Washington DC. *apud* GREENPEACE, 1999 *Op. cit.*
- HÜTTER, U., 1973, *A Wind Turbine with a 34 –m Rotor Diameter*, NASA Technical Translation TT R-14,879 (I.Kanner Associates), Washington, DC.: National Aeronautics and Space Administration. *apud* DIVONE, 1994 *Op. cit.*
- HÜTTER, U., 1974, "Review of Development in West-Germany", *Proceedings, Workshop on Advanced Wind Energy Systems*, Vol. 1, 1974 (published 1976), O. Ljungström, ed. Stockholm: Swedish Board of Technical Development and Swedish State Power Board, pp 1-51 to 1-72 *apud* DIVONE, 1994 *Op. cit.*
- JACOBS, M. L., 1973, "Experience with Jacobs Wind-Driven Electric Generating Plant", *Proceedings, First Wind Energy Conversion Systems Conference*, NSF/RANN-73-106, Washington, DC: National Science Foundation, pp 155-158. *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*
- JULL, J., 1964, "Design of Wind Power Plants in Denmark" *Wind Power, Proceedings of United Nations Conference on New Sources of Energy*, Vol. 7, New York: The United Nations, pp 229-240 *apud* DIVONE, 1994 *Op. cit.*
- KOEPPL, G.W., 1982, *Putnam's Power from the Wind*, ed. 2 Van Nostrand Reinhold Co., New York. *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*
- KROHN, S. 1997, "Offshore Wind Energy: Full Speed Ahead". In: JAMESxJAMES. *The World Directory of Renewable Energy: Suppliers and Services*, London.
- MONTEZANO, B.E.M., 2007. *Modelo Dinâmico de Visualização de um Aerogerador com Velocidade de Rotação Variável e Controle de Passo em VRML*. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brazil, 137 pp.
- MURACA, R.J., STEPHEN, S., V. *et al*, 1975, *Theoretical Performance of Vertical Axis Windmills*, NASA TMX-72662, Hampton, VA: NASA Langley Research Center. *apud* DIVONE, 1994 *Op. cit.*
- PAVINATTO, Eduardo Fiorini, 2005. *Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- PUTHOFF, R. L., e SIROCKY, P. J., 1974, *Preliminary Design of a 100-kW Wind Turbine Generator*, NASA TMX-71585, ERDA/NASA/1004-77/6, Cleveland, Ohio: NASA Lewis Research Center. *apud* DIVONE, 1994 *Op. cit.*
- PUTNAM, G. C., 1948, *Power from the Wind*, Van Nostrand Reinhold Co., New York. *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*

- RAIAMBAL, K., CHELLAMUTH, C., 2002. "Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Electric Generating System", In: *Proceedings of IEEE TENCON'02*, pp. 1847-1952.
- SANDIA, 2006, *Vertical Axis Wind Turbine: The History of the DOE Program*. Disponível na INTERNET via http://www.sandia.gov/Renewable_Energy/wind_energy/topical.htm. Arquivo consultado em Junho, 2006.
- SCIENTIFIC AMERICA, Dec. 20, 1890, "Mr. Brush's Windmill Dynamo" Vol. LXIII, n. 25 cover and p. 389. *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*
- SEKTOROV, V. R., 1934, "The First Aerodynamic Three-Phase Electric Power Plant in Balaclava", *L'Elettrotecnica*, 21(23-24), pp. 538-542; Traduzido por Scientific Translation Service, NASA TT-F-14933, Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration, pp. 13 *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*
- SHEPHERD, D.G., 1994, "Historical Development of the Windmill". In *Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering*, SPERA, S.A, (ed), 1 ed. New York, ASME Press, pp 1-46.
- SHELTENS, R.K. e BIRCHENOUGH, A.G., 1983, *Operational Results for the Experimental DOE/NASA Mod-0A Wind Turbine Project*, NASA TM-83517, DOE/NASA/20320-55, Cleveland, Ohio: NASA Lewis Research Center. *apud* DIVONE, 1994 *Op. cit.*
- TAYLOR, C.W., 2008. "Rotor hub for a 1.5 / 2.0 megawatt wind turbine". Arquivo disponível na internet via <http://www.cwtaylor.co.uk/news/body.htm>. Arquivo consultado em 2007.
- TWELE, J., GASCH, R., 2002. *Wind Power Plants – Fundamentals, Design, Construction and Operation*. ISBN 1-902916-36-7, James & James London.
- VOADEN, G.H., 1943, "The Simith-Putnam Wind Turbine – A Step Forward in Aero-Electric Power Research", *Turbine Topics*, 1(3); reprinted 1981 in NASA CP-2230, DOE CONF-810752, pp. 34-42, Cleveland, Ohio: NASA Lewis Research Center. *apud* SHEPHERD, 1994 *Op. cit.*
- Wind Power Monthly, 2006. Wind Statistic. Arquivo disponível na internet via <http://www.windpower.com/statistics.html>. Arquivo consultado em 2006.
- Wind Power Monthly, 2004. Wind Statistic. Arquivo disponível na internet via <http://www.windpower.com/statistics.html>. Arquivo consultado em 2004.
- World Wind Energy Association – WWEA, 2006. *Wind Energy International 2005-2006*. ISBN 81-7525-641-9 ed. WWEA, New Delhi, India.
- World Wind Energy Association – WWEA, 2008. Press Release "Wind turbines generate more than 1 % of the global electricity" 21 February 2008. WWEA, Bonn, Germany.

ANEXO I - MAPA DE TEMÁTICO DA VELOCIDADE MÉDIA ANUAL DO VENTO A 50 METROS DE ALTURA EM m/s



WWW

ANEXO II - USINAS EÓLICAS EM OPERAÇÃO NO BRASIL

USINAS do tipo EOL em Operação					
Usina	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Eólica de Prainha	10.000	10.000	PIE	Wobben	Aquiraz - CE
Eólica de Taíba	6.200	5.000	PIE	Wobben	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólica-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho	1.000	1.000	SP	CEMIG	Gouveia - MG
Eólio - Elétrica de Palmas	2.500	2.500	PIE	Centrais Eólicas do Paraná Ltda	Palmas - PR
Eólica de Fernando de Noronha	225	225	PIE	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Fernando de Noronha - PE
Parque Eólico de Beberibe	25.600	25.600	PIE	Usina Eólica Econergy Beberibe S.A.	Beberibe - CE
Mucuripe	2.400	2.400	PIE	Wobben	Fortaleza - CE
RN 15 - Rio do Fogo	49.300	49.300	PIE	Energias Renováveis do Brasil S.A.	Rio do Fogo - RN
Eólica de Bom Jardim	600	600	PIE	Parque Eólico de Santa Catarina Ltda	Bom Jardim da Serra - SC
Eólica Olinda	225	225	PIE	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Olinda - PE
Parque Eólico do Horizonte	4.800	4.800	APE-COM	Central Nacional de Energia Eólica Ltda	Água Doce - SC
Macau	1.800	1.800	APE	Petróleo Brasileiro S/A.	Macau - RN
Eólica Água Doce	9.000	9.000	PIE	Central Nacional de Energia Eólica Ltda	Água Doce - SC
Parque Eólico de Osório	50.000	50.000	PIE	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	50.000	PIE	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50.000	50.000	PIE	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Millennium	10.200	10.200	PIE	SPE Millennium Central Geradora Eólica S/A	Mataraca - PB
Total: 17 Usina(s)			Potência Total: 272.650 kW		

Legenda	
SP	Serviço Público
PIE	Produção Independente de Energia
APE	Autoprodução de Energia

(Fonte: www.aneel.gov.br, 2008)

