

Energia Eólica

Princípios e Tecnologia

Organização:
Ricardo Dutra

ENERGIA EÓLICA

PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS

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



Energia Eólica

Princípios e Tecnologias

Organização:

Ricardo Dutra

Diagramação e Arte Final:

Bruno Montezano

José Carlos E. Ferreira



Energia Eólica

Princípios e Tecnologias

1	História da Energia Eólica e suas utilizações	7
1.1	Desenvolvimento dos Aerogeradores no Século XX	10
1.2	A evolução comercial de aerogeradores de grande porte	15
1.3	A potência eólica instalada no mundo	16
2	O Recurso Eólico	18
2.1	Mecanismos de Geração dos Ventos	18
2.2	Fatores que influenciam o regime dos ventos	20
3	Energia e Potência Extraída do Vento	22
4	Tipos de aerogeradores para Geração de Energia Elétrica	29
4.1	Rotores de Eixo Vertical	29
4.2	Rotores de Eixo Horizontal	29
4.3	Mecanismo de Controle	37
5	Sistema Elétrico de um aerogerador e qualidade de energia	42
5.1	Aerogeradores com velocidade constante	42
5.2	Aerogeradores com velocidade variável	43
5.3	Qualidade da energia	44
6	Aplicações dos Sistemas Eólicos	47
6.1	Sistemas Isolados	47

6.2	Sistemas Híbridos	48
6.3	Sistemas Interligados à Rede	49
6.4	Sistemas Off-Shore	50
7	Bibliografia	52
	Anexo I - Potencial Eólico Brasileiro	57
	Anexo II - Parques Eólicos Instalados no Brasil	58

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 caminhado 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

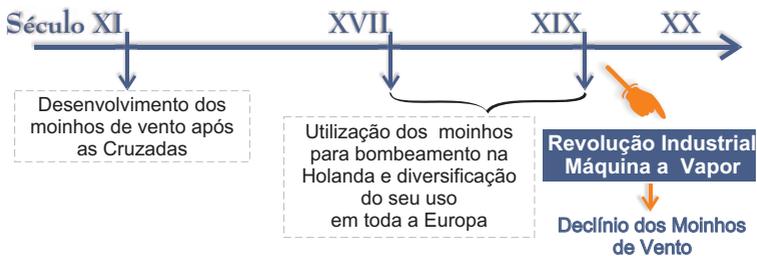


Figura 1 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no período do Séc. XI ao Séc. XIX (Fonte: Dutra, 2001)

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.

Na Holanda, entre os séculos XVII a XIX, o uso de moinhos de vento em grande escala esteve amplamente relacionado 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 1.000m³/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 9.000 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 (3.000 moinhos de vento), Inglaterra (10.000 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 no 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 2.500 moinhos de ventos em operação, caindo para menos de 1.000 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 Aero geradores 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 à geração de energia elétrica. Tratava-se de um cata-vento que fornecia 12kW 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 36cm 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 Brush foi um marco na utilização dos cata-ventos para a geração de energia elétrica.

O invento de Brush apresentava três importantes inovações para o desenvolvimento do 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 500rpm. 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 100kW conectado, por uma linha de transmissão de 6,3kV de 30km, a

uma usina termelétrica de 20MW. 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 280.000kWh.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).

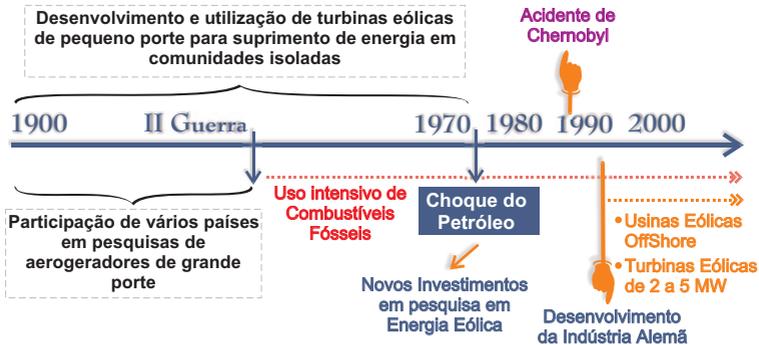


Figura 3 - Principais marcos do desenvolvimento da Energia Eólica no Século XX (Fonte: Dutra, 2001)

Após o desenvolvimento desse modelo, foram projetados outros modelos mais ambiciosos de 1MW e 5MW. 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 (1.939-1.945) 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 53,3m de diâmetro, uma torre de 33,5m de altura e duas pás de aço com 16 toneladas. Na geração elétrica, foi usado um gerador síncrono de 1.250kW com rotação constante de 28rpm, que funcionava em corrente alternada, conectado diretamente à rede elétrica local (VOADEN,1943 *apud* SHEFHERD, 1994) (PUTNAM,1948 *apud* SHEFHERD, 1994) (KOEPL, 1982 *apud* SHEFHERD, 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 (SHEFHERD, 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 100kW em Cape Costa, Ilhas Orkney (CHESF-BRASCEP, 1987) (DIVONE, 1994). Também na década de cinquenta, foi desenvolvido um raro modelo de aerogerador de 100kW 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 la Cour e Johannes Juul (JUUL, 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.Smith (F.L.S) foi a pioneira no desenvolvimento de uma série de aerogeradores de pequeno porte, na faixa de 45kW. 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 200kW com 24m 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 SydÆstsjælland's Elektricitets Aktieselskab (SEAS), no período entre 1958 e 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 16,5m/s. Esse modelo esteve em operação, conectado à 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 132kW a vento de 13,5m/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 1.085kW a vento de 16,5m/s, apresentava três pás com um rotor de 35m. Esses três protótipos mostraram claramente a possibilidade de se conectar aerogeradores à 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 aerogeradores de grande porte

O comércio de aerogeradores 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 aerogeradores desde 1985.

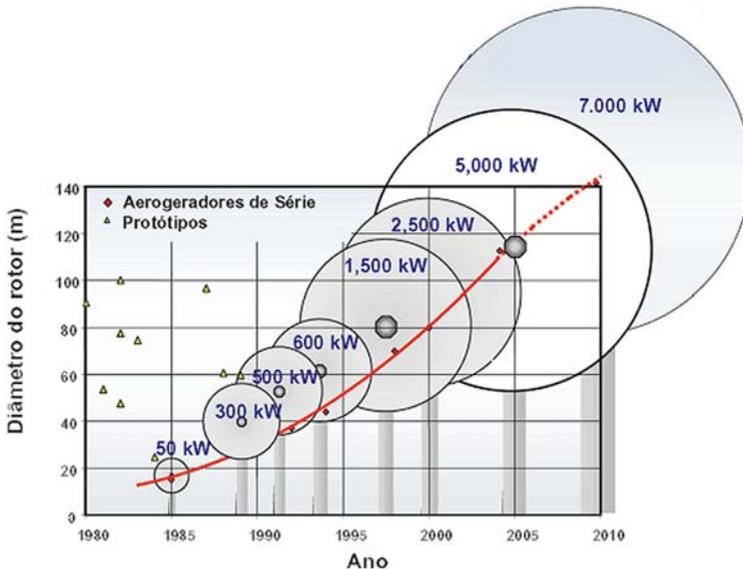


Figura 4 - Evolução dos aerogeradores desde 1985 até 2005
(Fonte: DEWI, 2.005)

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 potência eólica instalada em diversos países desde 1998.

Tabela 1 - Utilização internacional da energia eólica.

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						
Finiândia	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)

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.

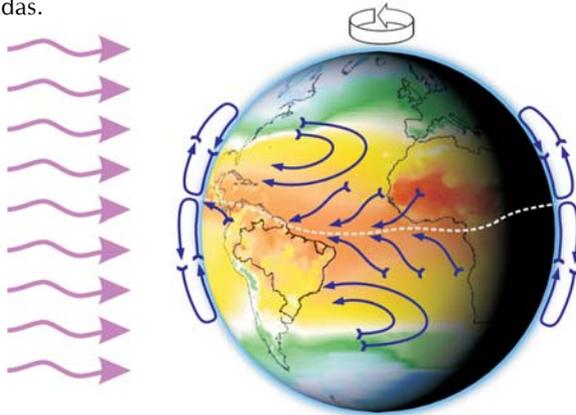
2.1 Mecanismos de Geração dos Ventos

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 conseqüência, 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 do vento. Além das variações topográficas e 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.

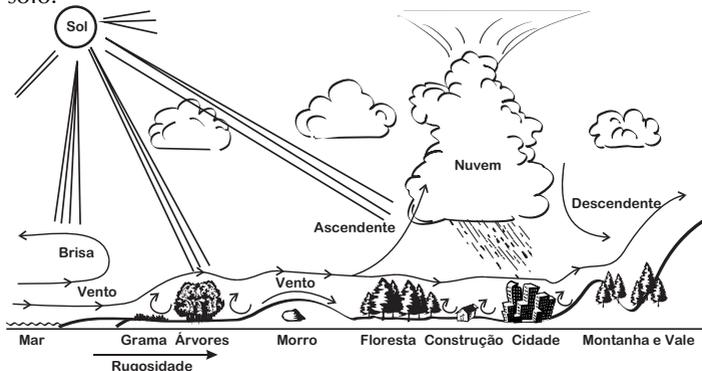


Figura 6 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno (Fonte: Atlas Eólico do Brasil, 1998)

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 no 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/m^3]

A = área da seção transversal [m^2]

v = velocidade do vento [m/s]

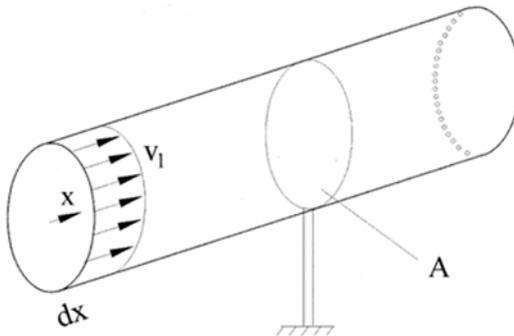


Figura 7 - Fluxo de ar através de uma área transversal A

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 no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador 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.

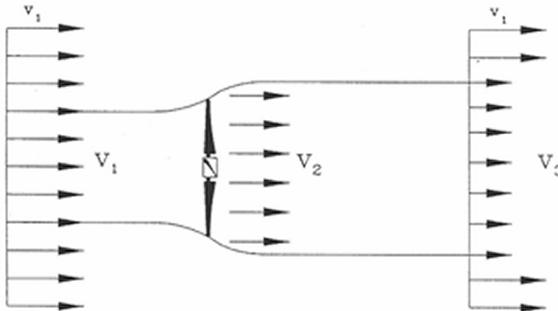


Figura 8 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.

Como na figura 8, 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 pelo aerogerador 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-se assumir que a relação entre as velocidades v_1 , v_2 e v_3 é dada por:

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

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:

$$\text{Potência do Vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$\text{Coeficiente de Potência } c_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[1 - \left(\frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

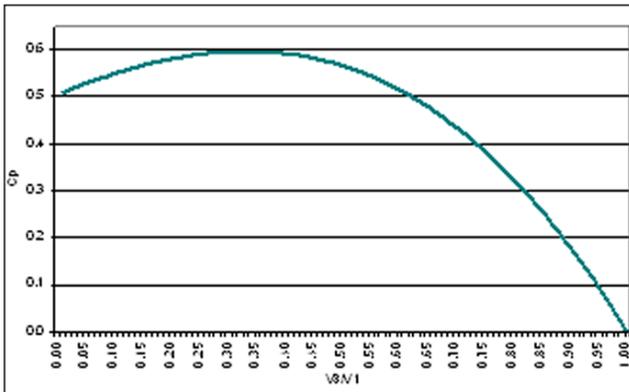


Figura 9 – Distribuição de c_p em função de

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

$$Cp_{Betz} = \frac{16}{27} = 0,59$$

onde $v_3/v_1 = 1/3$.

A figura 10 mostra as principais forças atuantes em uma pá do aerogerador, 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 do aerogerador (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 do aerogerador.

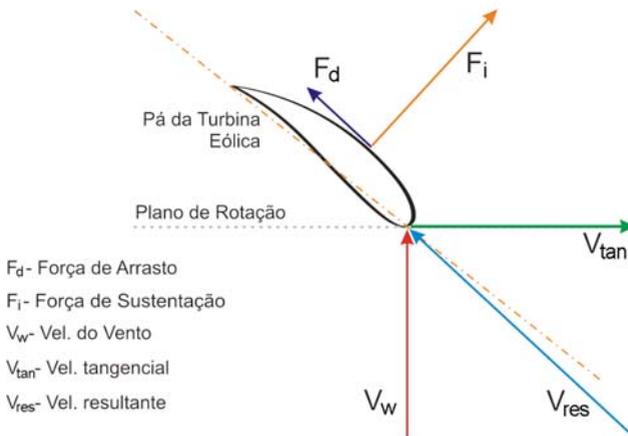


Figura 10 – Principais forças atuantes em uma pá de aerogerador
(Fonte: Montezano, 2008)

A potência mecânica extraída do vento pelo aerogerador 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 do aerogerador

λ – razão entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*tip speed ratio*)

ω_{wt} – velocidade angular do rotor [rad/s]

R – raio do rotor [m]

ρ – densidade do ar [Kg/m³]

A – área varrida pelo rotor [m²]

v_w – velocidade do vento incidente no rotor [m/s]

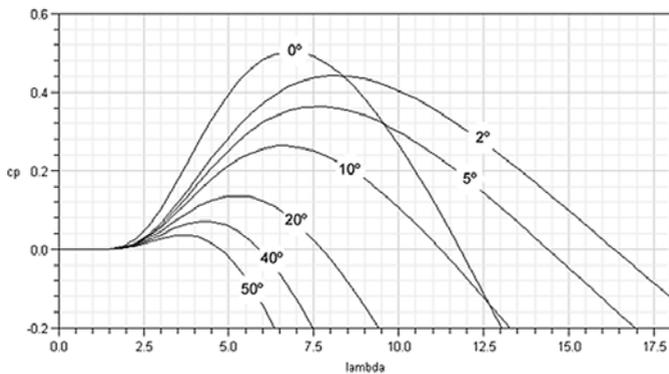


Figura 11 – Característica $c_p(\lambda, \beta)$ traçadas em função de aproximações numéricas (Fonte: Montezano, 2008)

Na equação (3.11), o coeficiente de potência $c_p(\lambda, \beta)$ depende das características do aerogerador, sendo função da razão de velocidades λ e do ângulo de passo β das pás (pitch) do aerogerador. 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 .

4 Tipos de Aerogeradores para Geração de Energia Elétrica

4.1 Rotores de Eixo Vertical

Em geral, os rotores de eixo vertical têm a vantagem de não necessitarem de mecanismos de acompanhamento para variações da direção do vento, o que reduz a complexidade do projeto e os esforços devido às forças 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 - Aerogerador 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 - Aerogerador 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 um aerogerador de eixo horizontal

As principais configurações de um aerogerador de eixo horizontal podem ser vistas na figura 14. Estes aerogeradores são diferenciadas pelo tamanho e formato da nacela, pela presença ou não de uma caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador utilizado (convencional ou multipolos). A seguir são apresentados os principais componentes do aerogerador que são, de uma forma geral, a torre, a nacela e o rotor.

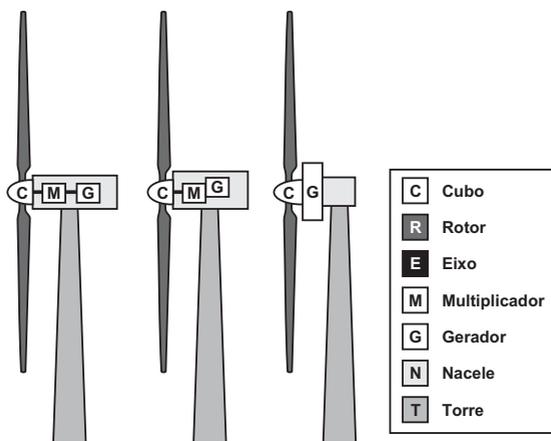


Figura 14 - Componentes de um aerogerador de eixo horizontal

4.2.1.1 Nacele

É a carcaça montada sobre a torre, onde se situam o gerador, a caixa de engrenagens (quando utilizada), todo o sistema de controle, medição do vento e motores para rotação do sistema para o melhor posicionamento em relação ao 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.

- | | |
|---|---|
| 1. Controlador do Cubo | 11. Transformador de alta tensão |
| 2. Controle pitch | 12. Pás |
| 3. Fixação das pás no cubo | 13. Rolamento das pás |
| 4. Eixo principal | 14. Sistema de trava do rotor |
| 5. Aquecedor de óleo | 15. Sistema hidráulico |
| 6. Caixa multiplicadora | 16. Plataforma da nacele |
| 7. Sistema de freios | 17. Motores de posicionamento da nacele |
| 8. Plataforma de serviços | 18. Luva de acoplamento |
| 9. Controladores e Inversores | 19. Gerador |
| 10. Sensores de direção e velocidade do vento | 20. Aquecimento de ar |

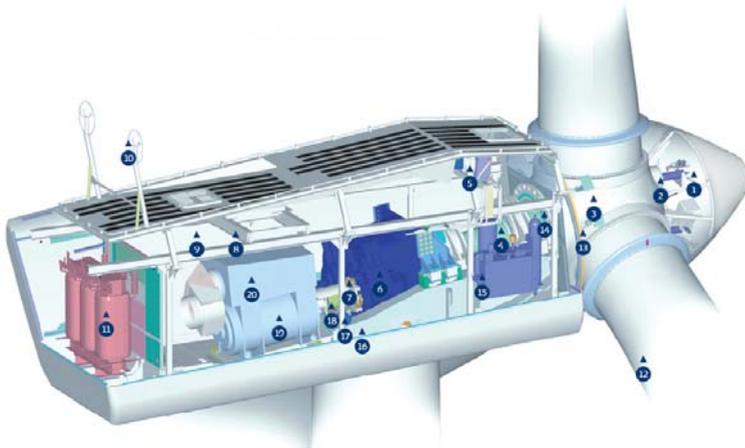


Figura 15 – Vista do interior da nacele de uma turbina eólica utilizando um gerador convencional (Fonte: VESTAS, 2006)

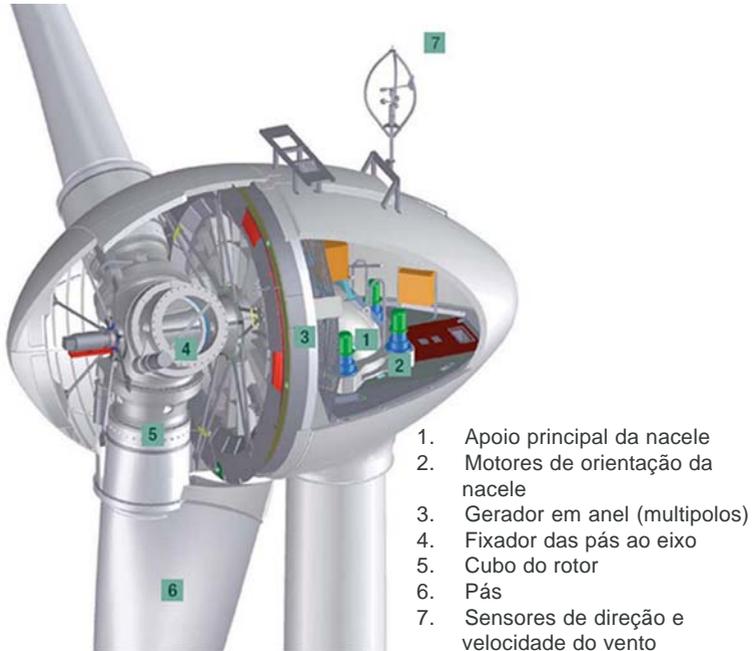


Figura 16 – Vista do interior da nacela de um aerogerador utilizando um gerador multipolos (Fonte: ENERCON, 2006)

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 em alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epoxi. Nos aerogeradores 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 do aerogerador denominada cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para os aerogeradores 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 aerogeradores de grande porte, 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 o gerador. 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 150rpm, devido às restrições de velocidade na ponta da pá (*tip speed*). Entretanto, geradores (sobretudo geradores síncronos) trabalham em

rotações muito mais elevadas (em geral, entre 1.200 a 1.800rpm), tornando necessária 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 construí-los. 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 à 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 sistema 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;
- dificuldade 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 ao sistema de conversão de energia eólica.

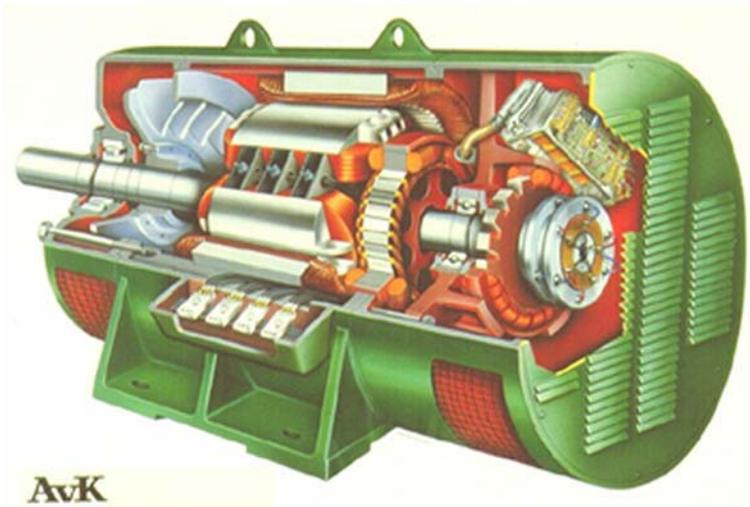


Figura 19 - Gerador convencional



Figura 20 - Gerador multipolos

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 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 toda 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.

4.3.1 Controle de Passo

O controle de passo é um sistema ativo que normalmente necessita de uma informação vinda do sistema de controle. 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 do vento. Para todas as velocidades de vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que o aerogerador produza apenas a potência nominal.

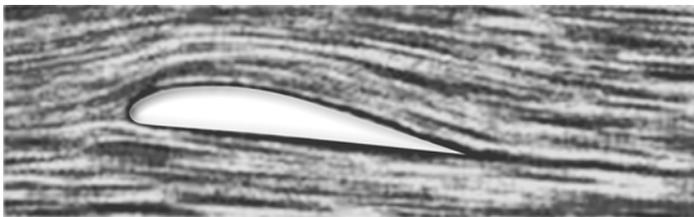


Figura 21 - Fluxo aderente ao perfil

Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície (Figura 21), produzindo, portanto, sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto. Aerogeradores com controle de passo são mais sofisticadas do que as de

passo fixo, controladas por estol, porque 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.

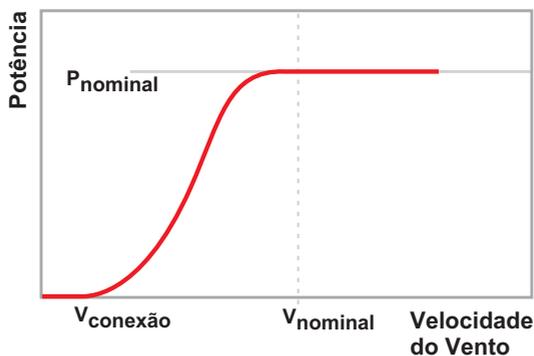


Figura 22 - Forma típica de uma curva de potência de um aerogerador com controle de passo

4.3.2 Controle Estol

O controle 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 (estol) (Figura 23), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as 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.

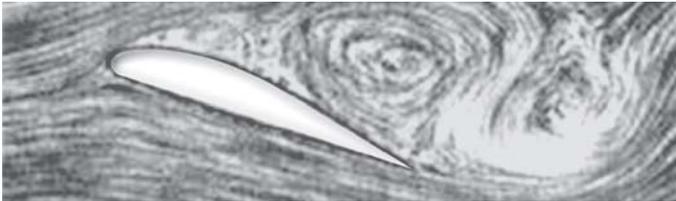


Figura 23 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil

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. Aerogeradores 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.

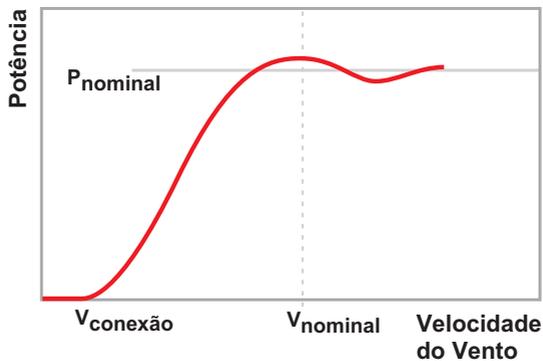


Figura 24 - Curva de potência típica de um aerogerador com controle tipo estol.

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 do aerogerador. A baixa rotação do aerogerador 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:

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

A figura 25 mostra um esquema elétrico de um aerogerador com velocidade constante. Estas máquinas usam geradores elétricos assíncronos,

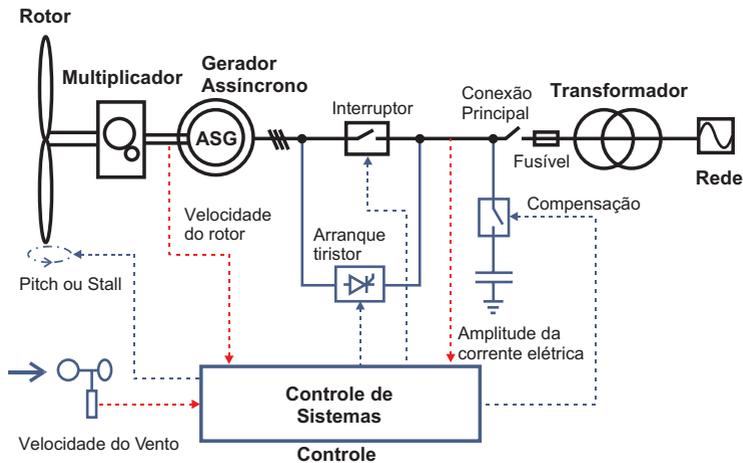


Figura 25 – Esquema elétrico de um gerador com velocidade constante (DEWI, 2005)

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 podem ser suavizadas por um tiristor de corrente, ou de partida.

5.2 Aerogeradores com velocidade variável

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

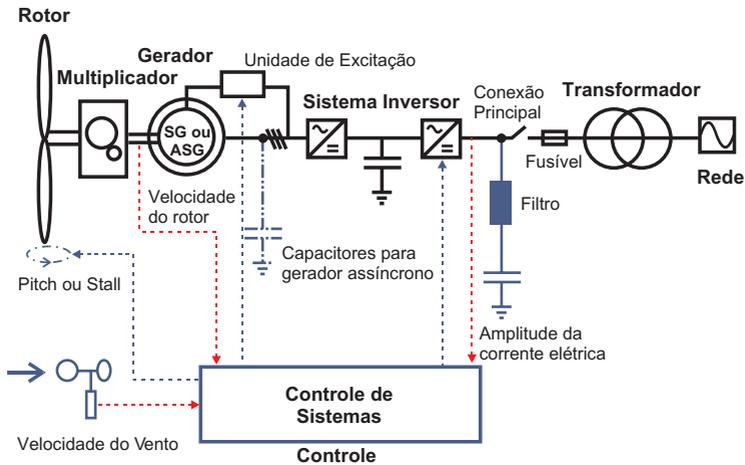


Figura 26 – Esquema elétrico de um gerador com velocidade variável que usa um conversor de frequência para o controle da frequência da geração elétrica (DEWI, 2005)

A conexão ao sistema elétrico é feita por meio de um conversor de frequência eletrônico, formado por um conjunto retificador/inversor. A tensão produzida pelo gerador síncrono é retificada e a corrente contínua resultante é invertida, com o 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 do conversor, a

freqüência 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 instalar os capacitores antes do retificador, uma vez que o conversor de freqüência 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 freqüência 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 do aerogerador, da freqüência 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 conversão de freqüência, que podem ser reduzidos significativamente com o uso 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 do aerogerador

onde quaisquer perturbações sobre a rede elétrica devem ser mantidas dentro de limites técnicos estabelecidos conforme 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, podem ser encontradas situações onde a potência elétrica fornecida pelo aerogerador alcance valores compatíveis com a capacidade da rede. Onde a rede é fraca¹, a qualidade da energia deve ser uma das principais questões a serem observadas sobre a utilização de aerogeradores (tamanho, tipo de controle, etc.)

Tabela 2 – Distúrbios causados por aerogeradores à rede elétrica

Distúrbios	Causa
Elevação / queda de tensão	Valor médio da potência entregue
Flutuações de tensão e cintilação	Operações de chaveamento Efeito de sombreamento da torre Erro de passo da pá Erro de mudança de direção Distribuição vertical do vento Flutuações da velocidade do vento Intensidade de turbulências
Harmônicos	Conversores de frequência Controladores tiristorizados Capacitores
Consumo de potência reativa	Componentes indutivos ou sistemas de geração

(Fonte: CARVALHO,2003)

¹ O conceito de rede “fraca” ou “forte” está intimamente ligado à 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)

A tabela 2 descreve os principais distúrbios causados por aerogeradores 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 no aerogerador (GERDES,1997).

É importante observar que os cuidados na conexão à rede elétrica devem ser observados e avaliados ainda na fase de planejamento. Quando várias máquinas eólicas são conectadas em um parque, o nível de potência entregue por unidade pode variar devido à localização das máquinas no parque e o efeito de “sombra” causado pelos aerogeradores a montante àqueles que se encontram 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 à rede elétrica, operando com velocidade quase constante, geram flutuações mais significativas do que geradores síncronos em velocidade variável, conectados à 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 à 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 casos, de uma unidade de armazenamento.



Pequeno Porte ($\leq 10\text{kW}$)

- Residências
- Fazendas
- Aplicações Remotas



Intermediário (10 - 250 kW)

- Geração Distribuída
- Sistemas Híbridos



Grande Porte (250 kW - +2 MW)

- Fazendas Eólicas
- Geração Distribuída

Figura 27 - Considerações sobre o tamanho dos aerogeradores 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 evitar danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda.

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 utilizar eletrodomésticos convencionais.

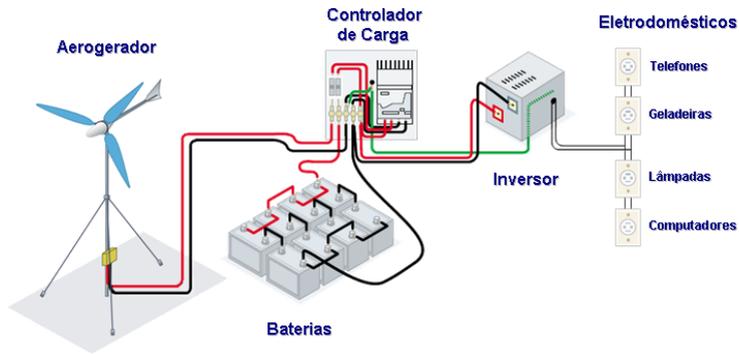


Figura 28 - Configuração de um sistema eólico isolado

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.

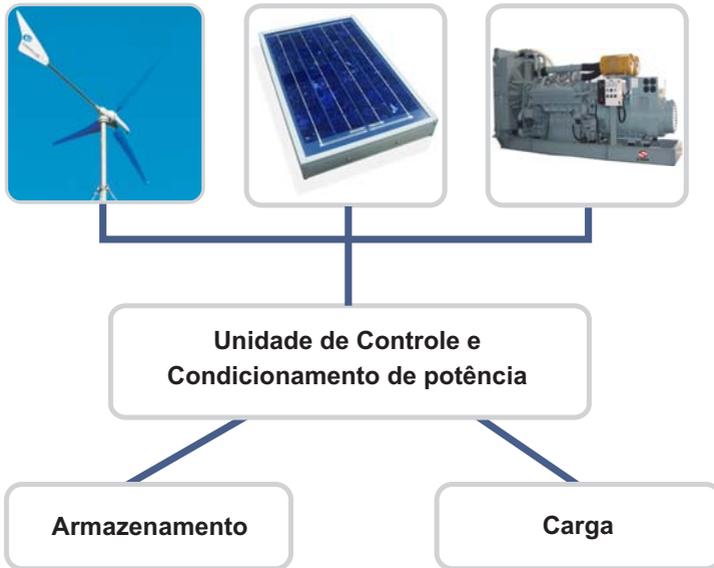


Figura 29 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel

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 120 GW (WWEA,2009).



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

6.4 Sistemas Off-Shore

As instalações off-shore representa a nova fronteira da utilização da energia eólica. Embora representem instalações de maior custo de transporte, instalação e manutenção, as instalações off-shore têm crescido a cada ano principalmente com o esgotamento de áreas de grande potencial eólico em terra.



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

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.

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 fo 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 – Pontíficia 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.

ELETRORRÁS-SCIENTIA, 1977, *Sistemas de Conversão de Energia Eólica*, Rio de Janeiro.

ESSLEMONT, E., MOCCORMICK, M, 1996, "Sociological Impact of a Wind Farm Development". In: JAMESxJAMES. *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 for 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 for 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: JAMES JAMES. *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 SHEFHERD, 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 SHEFHERD, 1994 Op. cit.*

SHEFHERD, 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.

SHELTERS, 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, 2009. Wind Energy International 2007-2008. 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 - Potencial Eólico Brasileiro

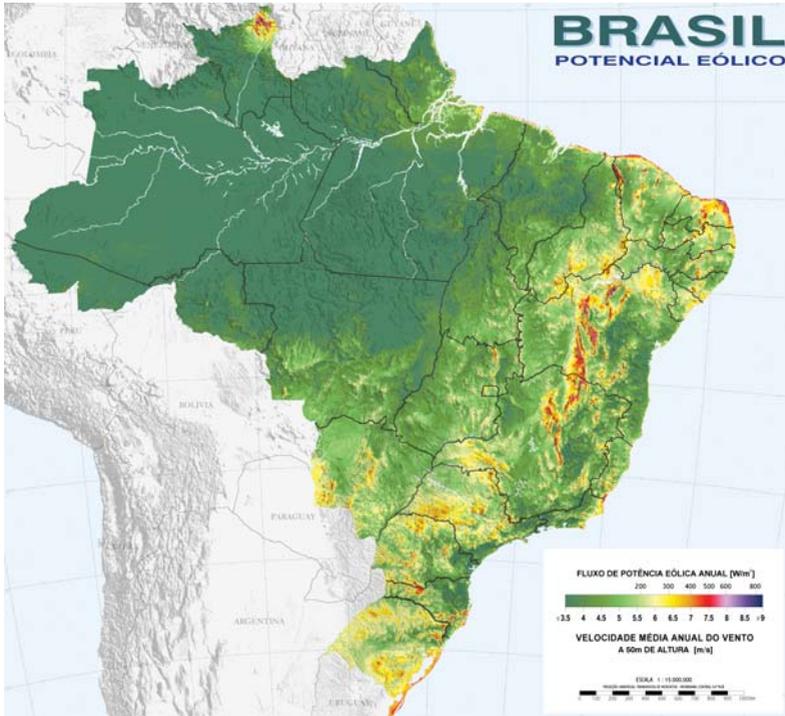


Figura 1 - Mapa temático da Velocidade Média Anual do Vento a 50 metros de altura em m/s (Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro. CEPEL, 2001)

ANEXO II - Parques Eólicos Instalados no Brasil

USINAS do tipo EOL em Operação			
Usina	Potência (kW)	Proprietário	Município
Eólica de Prainha	10.000	Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda	Aquiraz - CE
Eólica de Taiba	5.000	Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólica-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho	1.000	CEMIG Geração e Transmissão S/A	Gouveia - MG
Eólio - Elétrica de Palmas	2.500	Centrais Eólicas do Paraná Ltda.	Palmas - PR
Eólica de Fernando de Noronha	225	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Fernando de Noronha - PE
Parque Eólico de Beberibe	25.600	Usina Eólica Econergy Beberibe S.A.	Beberibe - CE
Mucuripe	2.400	Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda	Fortaleza - CE
RN 15 - Rio do Fogo	49.300	Energias Renováveis do Brasil S.A.	Rio do Fogo - RN
Eólica de Bom Jardim	600	Parque Eólico de Santa Catarina Ltda	Bom Jardim da Serra - SC
Foz do Rio Choró	25.200	SIIF Cinco Geração e Comercialização de Energia S.A.	Beberibe - CE
Eólica Olinda	225	Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Olinda - PE
Eólica Canoa Quebrada	10.500	Rosa dos Ventos Geração e Comercialização de Energia S.A.	Aracati - CE
Lagoa do Mato	3.230	Rosa dos Ventos Geração e Comercialização de Energia S.A.	Aracati - CE
Parque Eólico do Horizonte	4.800	Central Nacional de Energia Eólica Ltda	Água Doce - SC
Eólica Paracuru	23.400	Eólica Paracuru Geração e Comercialização de Energia S.A.	Paracuru - CE
Pedra do Sal	18.000	Econergy Pedra do Sal S.A.	Parnaíba - PI
Macau	1.800	Petróleo Brasileiro S/A	Macau - RN
Eólica Água Doce	9.000	Central Nacional de Energia Eólica Ltda	Água Doce - SC
Parque Eólico de Osório	50.000	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Taiba Albatroz	16.500	Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	São Gonçalo do Amarante - CE
Parque Eólico dos Índios	50.000	Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Millennium	10.200	SPE Millennium Central Geradora Eólica S/A	Mataraca - PB
Presidente	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Camurim	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Albatroz	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos I	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos III	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Atlântica	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Caravela	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos II	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos IV	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Mataraca	4.500	Vales dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Total: 33 Usina(s)		Potência Total: 414.480 kW	

(Fonte: ANEEL, 2009)



Ministério de
Minas e Energia

