



CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA  
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM APERFEIÇOAMENTO DE MÁQUINAS

JOSE GUILHERME DIAS NETO

**ENERGIA EÓLICA**

Rio de Janeiro-RJ

2012

CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA  
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM APERFEIÇOAMENTO DE MÁQUINAS

**ENERGIA EOLICA**

Monografia entregue em 16 de Agosto de 2012 na conclusão do Programa de Pós-Graduação do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha para obtenção do título de Aperfeiçoamento para Oficial de Máquinas.

---

**Professor Orientador : Ms Elizabeth Fatima Lourenço Borges.**

---

**Aluno :José Guilherme Dias Neto**

Rio de Janeiro

2012

Banca Examinadora,

---

Professor MSC

---

Professor

---

Prof.MS

Média Final \_\_\_\_\_.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me dar saúde, e em especial à minha família, por estarem ao meu lado nesta caminhada. A todos os meus amigos que nunca mediram esforços pra me ajudar nas horas mais difíceis

Grandes realizações são possíveis quando se dá importância aos pequenos  
começos”.

(Lao -Tzu).

## **RESUMO**

Este presente trabalho pretende abordar a respeito de um precioso meio de produção de energia limpa que é a energia eólica. Tanto no Brasil quanto no Mundo as ideias básicas, adaptadas a conceitos já existentes, todas focadas num só propósito, que é a melhoria das captação das correntes aéreas com o uso de hélices e geradores, para uso em vários segmentos da sociedade e possibilidades que venham a contribuir para minimizar a dependência dos combustíveis fósseis e suas consequências para a natureza. Qualquer contribuição no sentido de produzir energia limpa aproveitando as forças da natureza, neste caso o vento, com certeza é bem vinda hoje no mundo tão preocupado com a crescente demanda energética.

## **ABSTRACT**

This study addresses about a valuable means of generating clean energy is wind energy. Both in Brazil and the basic ideas in the world, adapted to existing concepts, all focused on one purpose, which is improving the uptake of air currents with the use of propellers and generators for use in various segments of society and opportunities that may to help reduce the dependence on fossil fuels and their consequences for nature. . Any contribution towards clean energy advantage of the forces of nature, in this case the wind is certainly welcome in today's world so concerned about the growing energy demand.

## **SÍMBOLOS, ABREVIATURAS, SIGLAS E CONVENÇÕES**

CEPEL- (centro de pesquisa de energia elétrica)

ABEEÓLICA-(associação brasileira de energia eólica)

DEWI- ( instituto de energia eólica alemã )

RISO - ( instituto de investigação dinamarquês )

ROCEL- ( programa nacional controle energia elétrica)

PND- ( programa nacional de conservação de energia )

ONS- ( operador nacional do sistema )

GCOI- ( grupo coordenador para operação interligada)

ANEEL-( agência nacional energia elétrica )

PIB – (produto interno bruto)

PROINFA-(programa de incentivo às fontes alternativas)

BNDES-(banco nacional desenvolvimento )

IDH- ( índice desenvolvimento humano )

EPE (empresa pesquisa energética ).



## ÍNDICE

INTRODUÇÃO.....	13
CAPITULO I – HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA.....	15
I.1) Um Breve Histórico Mundial .....	15
I.2) História da Energia Elétrica no Brasil .....	17
CAPITULO II – MECANISMO DE GERAÇÃO DOS VENTOS.....	18
II.1) A Geração dos Ventos.....	18
II.2) Fatores de Influência no Regime dos Ventos .....	22
II.3) Movimento das massas de ar .....	23
CAPÍTULO III – ENERGIA EÓLICA NO BRASIL SEC-XXI.....	25
III.1) Uma Realidade do Nosso Potencial.....	25
III.2) Dados Atuais da Condição Nacional.....	27
III.3) Futuro do Nosso Potencial Elétrico.....	28
CAPITULO IV – O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA EÓLICO.....	30
IV.1 ) Funcionamento Básico do Sistema Eólico.....	30
IV.2) Partes Principais de Um Gerador Eólico .....	31
IV.3) Estudo das Aplicações do Sistema Eólico.....	34
IV.3.1) Sistemas Isolados .....	35

IV.3.2) Sistemas Híbridos .....	35
IV.3.3 ) Sistemas Interligados a Rede.....	35
IV.4) Relação Entre Velocidade do Vento e Altura.....	36
IV.5) Geração Global dos Ventos.....	37
IV.6 ) Os Geradores.....	37
IV.7 ) Rotor Eólico.....	38
IV.7.1) Rotor de Eixo Horizontal.....	41
IV.7.2) Rotor de Eixo Vertical .....	42
IV.8 ) Transmissão Mecânica .....	42
IV.9 ) Os Controles do Sistema.....	43
IV.10 ) Controle de Passo.....	43
IV.11) Controle de Estol.....	43
CAPÍTULO V– CAPTAÇÃO OFF-SHORE.....	45
V.1) Sistema Off-Shore Esquema.....	46
V.2) As Turbinas Off-Shore.....	47
V.3) Formas de Sustentação.....	51
V.4) Vantagens da Captação Off-Shore.....	55
CAPITULO VI –MEIO AMBIENTE.....	56
VI.1) As Emissões de Gases.....	57
VI.2) Impacto Sobre a Fauna.....	58

VI.3) Ruidos.....	59
VI.4) Impacto Visual. ....	60
CONCLUSÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS, GRÁFICOS E TABELAS

Figura 1: Um Sistema Off-Shore.....	15
Figura 2: Moinhos do Passado.....	16
Figura 3: Circulação Global.....	21
Figura 4: Geração de Energia no Brasil 2010.....	27
Figura 5: Sistema de Geração Eólica.....	30
Figura 6: Partes Principais de um Gerador Eólico.....	31
Figura 7: Principais Partes de um Rotor.....	31
Figura 8:Um Típico Sistema Off-Shore. ....	46
Figura 9:Como é Feita a Ligação Off-Shore.....	53
Figura 10: Potencial Off-Shore nos EUA.....	54

## INTRODUÇÃO

A fonte eólica é uma importante opção de diversificação da matriz energética em vários países, a exemplo da Dinamarca, Espanha, Portugal e Alemanha. Do ponto de vista ambiental, o impacto do aproveitamento eólico é tão reduzido quanto ao das pequenas centrais hidrelétricas a fio d'água. Já do ponto de vista energético, dado o enorme potencial hídrico do país e a crescente força da biomassa, a fonte eólica perde colocação na ordem de prioridade. A questão do custo relativamente alto da energia eólica é outro ponto de importância. O que se extrai da discussão sobre a fonte eólica é que o tema, por sua importância mundial, requer atenção. A capacidade instalada no mundo é de aproximadamente 94 GW<sup>1</sup>, com destaque para a Alemanha (22 GW) e os EUA (17 GW). O crescimento da capacidade instalada tem sido expressivo. Em 2010, foram adicionados cerca de 20 GW de capacidade eólica no mundo. Países como a China e a Índia encontram-se entre os que mais investiram no setor.

As previsões do Global Wind 2010 indicam que, em 2013, a capacidade instalada mundial será de 260 GW. Essa expansão depende de forte patrocínio governamental na forma de subsídios e facilidades de financiamento em vários países.

O Brasil tem potencial eólico estimado em 143 GW (CEPEL, 2001), mas nossa capacidade instalada atual é de apenas 247 MW. São 16 plantas eólicas em operação no país, cuja capacidade corresponde a 0,23% da matriz elétrica.

Vários argumentos a favor da expansão do parque eólico no Brasil são identificados, em particular a forte complementaridade entre os períodos de chuva e de vento, o que dá margem para que os parques eólicos possam suprir energia durante a estação seca, propiciando o acúmulo de água nos reservatórios das grandes hidrelétricas e reduzindo a utilização da geração térmica. Ademais, a geração eólica não emite poluentes atmosféricos, contribuindo diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa decorrentes do sistema elétrico nacional.

Neste sentido, dado que a disponibilidade, o preço e a qualidade do suprimento energético são fundamentais para a competitividade do setor produtivo brasileiro, a agenda da indústria abraça a questão da diversificação da matriz como via de solução para afastar o fantasma do racionamento e assegurar níveis competitivos de preços da energia. Dada a necessidade de diversificar a matriz elétrica nacional, conhecendo as vantagens da energia eólica e a experiência internacional, podemos concluir que para alavancar a indústria e a geração eólica no Brasil torna-se necessária a definição de uma política efetiva de incentivo à participação das fontes alternativas renováveis. Essa política deve ter como foco as vantagens comparativas do país e estar alinhada com o objetivo de garantir as menores tarifas ao consumidor final, por isso o presidente da Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica), Ricardo Simões, previu que o desenvolvimento do setor vai gerar um grande volume de investimentos nos próximos anos. Atualmente o país conta com 57 parques eólicos em produção e tem 30 em construção, o que significa um investimento de R\$ 25 bilhões a R\$ 30 bilhões, e o setor eólico deve chegar em 2014 faturando mais de R\$ 3 bilhões por ano. Estamos em um processo de consolidação dessa indústria, com aumento de escala e ganho de competitividade. É um ciclo virtuoso, de uma energia limpa, renovável e sem emissão de gás do efeito estufa, disse Simões. Segundo ele, há condições para o Brasil chegar nos próximos dez anos a 20 GW de produção de energia eólica. O volume equivale a uma vez e meia a capacidade total de produção da maior hidrelétrica do país, a Usina de Itaipu.



Fig 01 –Um Sistema Off-Shore.

## **CAPITULO 1- HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA**

### **I.1- Um breve histórico mundial**

A energia eólica é a energia obtida pelo movimento do ar (vento). É uma abundante fonte de energia, renovável, limpa e disponível em todos os lugares.

Os moinhos de vento foram inventados na Pérsia no séc. V. Eles foram usados para bombear água para irrigação. Os mecanismos básicos de um moinho de vento não mudaram desde então: o vento atinge uma hélice que ao movimentar-se gira um eixo que impulsiona uma bomba gerador de eletricidade

Dominar o vento é um dos métodos mais antigos de produção de energia. A humanidade utiliza, desde a antiguidade, os moinhos de vento para moer os cereais e para bombear água. Com o surgimento da eletricidade no final do século XIX, os primeiros protótipos de turbinas eólicas modernas foram concebidos, utilizando tecnologia baseada no moinho de vento. Desde então, decorreu um processo moroso até

que a energia eólica fosse aceita como um método de produção de energia .



Figura- 02–Moinhos do passado

A crise petrolífera dos anos 70 e, sobretudo, o movimento anti energia nuclear nos anos 80 aumentaram o interesse pelas energias alternativas e intensificaram a investigação no sentido de encontrar novas formas ecológica e economicamente viáveis de produção de energia. As turbinas eólicas construídas nessa época eram utilizadas essencialmente para investigação e eram extremamente dispendiosas. Com a ajuda de programas de gestão e investigação internacional financiados pelo governo, bem como da criação de institutos de investigação, nos anos 80, continuaram a ser investigados, desenvolvidos e implementados novos métodos de produção de energias renováveis.

Institutos de investigação, como o Instituto de Energia Eólica Alemão (DEWI) e o Instituto de Investigação Dinamarquês Risø, bem como vários programas de investigação e cooperação internacionais no sector da energia eólica, contribuíram para os avanços industriais e tecnológicos dos pioneiros da energia eólica na atualidade . Devido à estreita cooperação entre os institutos de investigação e os pioneiros da energia eólica, foram desenvolvidos e implementados padrões internacionais, uma regulamentação precisa e um design cada vez mais eficientes, tendo resultado em parques eólicos modernos e economicamente viáveis.

Com o desenvolvimento da estação de energia eólica de 55 kW, em 1981, os custos outrora elevados da energia eólica foram drasticamente reduzidos. A energia



eólica é, atualmente, uma das fontes energéticas menos dispendiosas, se forem tidos em conta todos os custos externos (por exemplo, os danos ambientais).

## **I.2- História da Energia Elétrica no Brasil.**

A história da energia elétrica comercial no Brasil remonta o final do século XIX com a construção das primeiras usinas hidrelétricas e os primeiros trechos de iluminação pública. Na década de trinta o governo pela primeira vez atua no sentido de regular no mercado a fim de sanear os primeiros problemas de suprimento de energia. Na década de cinquenta o Brasil passa pela sua primeira crise de energia que culminou no racionamento, na época os motivos para tal foram quatro eventos sucessivos, a seca de 1951 a 1956, o crescimento da industrialização, urbanização dos grandes centros e a insuficiência de investimentos. Em 1957 o presidente Juscelino Kubitschek determina a construção da primeira grande usina hidroelétrica, a de Paulo Afonso, e a primeira grande termoelétrica, a usina de Piratininga.

Em 1962, no governo João Goulart, foram criados a Eletrobrás e o Ministério das Minas e Energia. Na década de sessenta e início dos anos setenta foi o momento de consolidação do sistema com o início da construção das maiores usinas hidroelétricas, com destaque para as usinas de Itaipu e Furnas. Na década seguinte o destaque foi a entrada em operação da usina de Itaipu e a primeira etapa da usina termonuclear de Angra. Mesmo com o lançamento do Programa Nacional de Conservação de Energia – PROCEL em 1985, o país enfrentou o seu segundo período de escassez de energia, e nos anos de 1987 e 1988 as regiões Norte e Nordeste foram obrigadas a reduzir o consumo inicialmente em 15% e posteriormente em 10%. A década de noventa foi o período da privatização do sistema, sendo lançado pelo governo do presidente Fernando Collor de Mello o PND – Programa Nacional de Desestatização. Nesse período foi criada a ONS – Operador Nacional do Sistema que veio a substituir o Grupo Coordenador para Operação Interligada – GCOI e entrou em operação a primeira etapa do sistema de interligação norte-sul. Um marco na história do setor elétrico brasileiro é a publicação da Lei nº 8.631 editada em março de 1993. Esta lei põe fim a equalização das tarifas que vigorara por vinte anos e que não contemplava as diferentes

características e custos de produção de cada área de concessão. O fim da tarifa única encerra o mecanismo que assegurava o retorno financeiro das concessionárias sem qualquer esforço por eficiência operacional e econômica (RELATÓRIO ANEEL 10 anos, 2008). Com a estabilização econômica a partir de 1994 e a transferência dos ativos do sistema elétrico do Estado para a iniciativa privada um novo cenário se instala com a mudança do “Estado investidor” para o “Estado regulador”. Em 1996 foi criada a ANEEL que tinha como missão “proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade. No entanto o primeiro leilão dos empreendimentos do setor elétrico só ocorreu em 1998. Em 2000 foi editado o Decreto 3.371 que incentiva a produção termoeletrica através da utilização do gás natural como principal fonte de termoeletricidade. No entanto em 2001 o país conheceu sua pior crise de energia com corte no consumo em 20% nas regiões Sul e Sudeste e 10% nas regiões Norte e Nordeste. A principal causa deste racionamento: a escassez de investimento no setor combinada com a situação hidrológica crítica. Este evento teve reflexos importantes no endividamento das empresas geradoras e distribuidoras e a retração do PIB nacional. Hoje sabemos que é cada vez mais interessante a busca de novas fontes de energia e uma delas que se enquadra bem no caso brasileiro e a energia eólica ,para isto vamos no próximo capítulo estudar os mecanismos dos ventos.

## **CAPÍTULO II- MECANISMO DE GERAÇÃO DOS VENTOS**

### **II.1) A Geração dos Ventos**

Este Capítulo apresenta uma análise dos fenômenos físicos responsáveis pela geração dos ventos, caracterizando-os como uma das muitas formas em que se manifesta a energia solar. Aborda, ainda, os mecanismos que influenciam na distribuição espacial da velocidade e modificam o regime local 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.

Em média, pode-se supor que 50% da energia irradiada pelo Sol é interceptada pelas nuvens (25% volta para o espaço, 23% atinge a Terra e 2% é absorvida pelas nuvens), 19% é absorvida pela Terra, 17% é absorvida pelos gases e poeira contidos na atmosfera, 12% é espalhada pelo ar (7% volta para o espaço e 5% atinge a superfície da Terra) e 2% é refletida pela Terra de volta ao espaço. Sendo assim, apenas 47% da energia irradiada pelo Sol é absorvida pela Terra, 34% é irradiada de volta para o espaço e 19% é absorvida pela atmosfera (SEINFELD, 1986). Portanto, grande parte da energia que atinge a superfície da Terra é emitida de volta para o espaço. Essa porção de energia é a principal responsável pelo aquecimento da atmosfera. 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.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, 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, gerando assim um movimento de ar (vento) em escala planetária.

Supondo que a Terra não tivesse movimento de rotação, esse seria o único mecanismo presente e seriam formadas duas células, uma em cada hemisfério, compondo o sistema de geração dos ventos. No hemisfério norte, os ventos tomariam a direção sul-norte e retornariam, junto à superfície da Terra, na direção norte-sul. No hemisfério sul, os ventos assumiriam a direção norte-sul para retornar, junto à superfície da Terra, na direção sul-norte.

Observa-se, porém, que no seu movimento em direção aos polos, a temperatura das partículas de ar decresce rapidamente (1<sup>a</sup> a 2<sup>o</sup>C por dia) Após percorrer aproximadamente um terço da distância, a temperatura já é suficientemente baixa e o ar começa seu movimento descendente. Conforme ilustra a Figura 3, parte da massa de ar move-se em direção ao Equador, formando a célula tropical (uma em cada hemisfério); o restante avança em direção aos polos. A parcela da massa de ar que se dirige aos

polos, junto à superfície da Terra, sofre um novo aquecimento e assume novamente um movimento ascendente, formando a célula temperada (uma em cada hemisfério). Novamente, uma parcela da massa de ar ascendente toma a direção polar formando a célula polar (uma em cada hemisfério). Entretanto, o movimento de rotação da Terra afeta a direção dessa circulação e produz três efeitos que modificam o mecanismo descrito acima.

O primeiro efeito tem pouca influência e consiste na compensação parcial da aceleração da gravidade, causada pela aceleração centrífuga.

O segundo efeito está associado à força de Coriolis que, no hemisfério norte acelera as partículas de ar para a direita de seu movimento e, no hemisfério sul, acelera as partículas de ar para a esquerda. O resultado desse efeito faz-se sentir através dos ventos geostróficos que são observados, principalmente, em altitudes superiores a 600 metros (SPERA, 1994).

De maior importância para o aproveitamento da energia eólica é o fenômeno que se observa nas camadas inferiores da atmosfera, consequência direta da viscosidade, que tende a manter as partículas de ar girando com a Terra. Esse fato lhes imprime uma quantidade de movimento orientada de oeste para leste. À medida que as partículas de ar se movem para os polos, elas também se aproximam do eixo de rotação da Terra e, para que a quantidade de movimento seja preservada, é necessário que assumam uma velocidade na direção de oeste para leste. Esse efeito é muito pequeno nas vizinhanças do Equador, mas torna-se relevante nas zonas temperadas. Esses mecanismos permitem elaborar o modelo de circulação global, conhecido como modelo de três células.

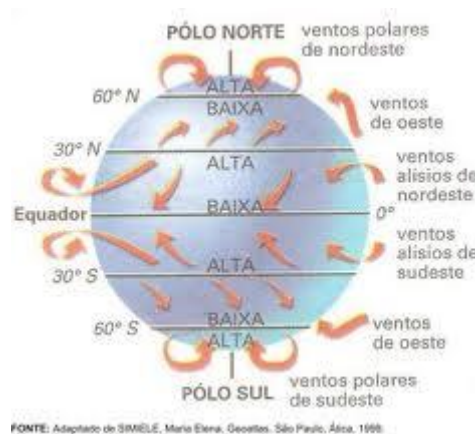


Figura 3. - Circulação global: Terra com movimento de rotação (caso real).

Como o eixo da Terra está inclinado de 23,5° 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 da Terra. Sobre posto a esse sistema global encontram-se os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos. Sendo assim, as análises de viabilidade para aproveitamento da energia dos ventos também devem considerar a importante influência dos ventos locais, que se manifestam em pequena escala.

As capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol são bastante variáveis para os diversos tipos de superfícies, tais como mares, continentes, matas, plantações, cerrados. Por esse motivo, a mais conhecida manifestação local dos ventos acontece nas regiões costeiras onde são observadas as brisas marinhas e terrestres. 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 marinha). 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 marinha devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

Outra importante 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. A Figura 3.3 mostra as variações diárias ocorridas no vento pela diferença de temperatura entre o mar e o continente e entre as montanhas e os vales.

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala (ventos locais) sofrem modificações que influenciam na distribuição espacial da velocidade dos ventos. Entre os principais responsáveis por essas alterações destacam-se o relevo, os obstáculos e a rugosidade. A seguir, será analisada a influência de cada um desses fatores.

## II.2- Fatores de Influência no Regime dos Ventos

De uma maneira geral, pode-se dizer que o regime dos ventos, isto é, o seu comportamento estatístico ao longo do dia, fica definido se for conhecido como a velocidade varia no tempo e no espaço. A velocidade dos ventos varia de um ponto para outro e é influenciada por vários acidentes topográficos. Além disso, fixado um ponto (uma estação anemométrica, por exemplo) a velocidade também varia com a altura. Tendo em vista que a velocidade do vento pode variar significativamente em curtas distâncias, por exemplo, 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. Tais parâmetros são:

- i. a presença de obstáculos nas redondezas;
- ii. a rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- iii. a orografia, como colinas, que podem causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

As informações sobre as condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos. Visitas aos locais de interesse também auxiliam na identificação da rugosidade do terreno e presença de obstáculos. Dados de satélite também são de grande importância na determinação desses fatores.

Varição da Velocidade com a Altura A Mecânica dos Fluidos mostra que a velocidade de um fluido que se movimenta junto à superfície deve se anular. Esse fato, observado em experimentos cuidadosamente conduzidos em laboratórios, está associado à viscosidade, uma propriedade física dos fluidos que é quantificada pelo coeficiente de viscosidade  $\mu$ .<sup>24</sup> Se o perfil de velocidade é levantado no sentido perpendicular à superfície, verifica-se que a velocidade do fluido passa deste valor (nulo) junto à superfície e atinge a velocidade do escoamento  $V$  em um curto espaço de tempo. Essa região, junto à superfície, onde se verifica uma rápida mudança no valor da velocidade é conhecida como camada limite.

As características da camada limite estão associadas a vários fatores, entre os quais os mais importantes são a velocidade do escoamento  $V$ , a massa específica do fluido  $\rho$ , a viscosidade do fluido  $\mu$ , o acabamento da superfície (rugosidade), a forma da superfície (presença de obstáculos, curvatura, etc.). Quando o escoamento é turbulento, o acabamento e a forma da superfície passam a ter grande importância no desenvolvimento da camada limite. O ar, ao se deslocar sobre a superfície terrestre, forma uma camada limite que se estende a grandes alturas e, em geral, o escoamento no seu interior é turbulento. Como as turbinas eólicas são instaladas no interior da camada limite, é de grande importância o conhecimento do perfil da velocidade ao longo de uma vertical, ou seja, a distribuição da velocidade com a altura. O desenvolvimento da camada limite terrestre é complexo e sofre a influência de diferentes fatores, incluindo aqueles de origem térmica, que podem causar instabilidades na atmosfera.

Tomando como referência resultados conhecidos da Mecânica dos Fluidos, foram desenvolvidos modelos que visam simular, mesmo que de forma aproximada, o desenvolvimento da camada limite terrestre. Para utilização em problemas relacionados com o aproveitamento da energia eólica, costuma-se descrever a distribuição de velocidade com a altura utilizando-se os modelos conhecidos como “Lei de Potência” e “Lei Logarítmica”. O modelo mais simples é representado pela Lei de Potência (“Power Law”), que resulta dos estudos da camada limite sobre uma placa plana. Esse modelo apresenta a vantagem de ser de fácil utilização; entretanto, os resultados obtidos não possuem a precisão necessária.

### II.3) Movimento das Massas de Ar.

De uma forma geral, os movimentos das massas de ar na atmosfera (vento) processam-se em regime turbulento. Sendo assim, a velocidade instantânea do vento é descrita simplificada como um valor médio acrescido de um desvio a partir da média (flutuação), tal que:  $V = \bar{V} + v'$ , tal que  $\bar{V}$  é a velocidade média do vento e  $v'$  é a flutuação. Na prática, para algumas aplicações, leva-se em consideração apenas a intensidade da velocidade média. A maioria dos instrumentos de medição, devido a sua configuração, "filtra" as flutuações e fornece somente o valor da velocidade média.

A direção do vento também é um importante parâmetro a ser analisado pois mudanças de direção frequentes indicam situações de rajadas de vento. Além disso, a medida da direção do vento auxilia na determinação da localização das turbinas em um parque eólico. Devido à existência do problema de "sombra", isto é, a interferência das esteiras das turbinas, é fundamental o conhecimento da direção predominante.

Do ponto de vista do aproveitamento da energia eólica, é importante distinguir os vários tipos de variações temporais da velocidade dos ventos, a saber: variações anuais, sazonais, diárias e de curta duração.

**Variações Anuais** - Para se obter um bom conhecimento do regime dos ventos não é suficiente basear-se na análise de dados de vento de apenas um ano; o ideal é dispor de dados referentes a vários anos. À medida que uma maior quantidade de dados anuais é coletada, as características levantadas do regime local dos ventos tornam-se mais confiáveis.

**Variações Sazonais** - O aquecimento não uniforme da superfície terrestre resulta em significativas variações no regime dos ventos, resultando na existência de diferentes estações do ano. Considerando que, em função da relação cúbica entre a potência disponível e a velocidade do vento (na altura do eixo da turbina), em algumas faixas de potência, uma pequena variação na velocidade implica numa grande variação na potência. Sendo assim, a utilização de médias anuais (ao invés de médias sazonais) pode levar a resultados que se afastam da realidade.

**Variações Diárias** - As variações diárias na velocidade do vento (brisas marítimas e terrestres, por exemplo) também são causadas pelo aquecimento não uniforme da superfície da Terra. Essas variações são importantes quando, após a escolha de uma região, procura-se o local mais adequado para a instalação do sistema eólico



dentro dessa área. Ao comparar a evolução da velocidade média ao longo do dia percebe-se que há uma significativa variação de um mês para os outros. Com esse tipo de informação pode-se projetar melhor o sistema eólico. Por exemplo, nos locais em que os ventos no período do dia são mais fortes do que os ventos no período da noite e a carga de pico ocorre durante o dia, a carga base pode ser fornecida pelo sistema existente e a carga adicional pelo sistema eólico. Entretanto, se a carga de pico ocorre durante a noite, provavelmente a demanda será maior que o disponível e um sistema de estocagem pode se fazer necessário.

**Variações de Curta Duração** - As variações de curta duração estão associadas tanto às pequenas flutuações quanto às rajadas de vento. Num primeiro momento, essas variações não são consideradas na análise do potencial eólico de uma região, desde que não assumam grandes proporções. As flutuações e a turbulência do vento podem afetar a integridade estrutural do sistema eólico, devido à fadiga que ocorre especialmente nas pás da turbina. Por outro lado, as rajadas, caracterizadas por aumentos bruscos de curta duração da velocidade do vento, geralmente acompanhadas por mudanças de direção, merecem maior atenção.

## **CAPÍTULO III – ENERGIA EÓLICA NO BRASIL SEC-XXI**

### **III.1) Uma Realidade do Nosso Potencial**

O Brasil possui 247 MW de capacidade eólica instalada, destacando-se o Rio Grande do Sul, com 150 MW, o Rio Grande do Norte, com 52 MW, e o Ceará, com 19 MW. Existem 16 plantas eólicas em operação no país, cuja capacidade corresponde a 0,23% da matriz elétrica brasileira. Dessas plantas, seis estão enquadradas no Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica - PROINFA (totalizam 218,5 MW de capacidade ou 88,5% do total). De acordo com o Atlas Eólico do Brasil, nosso potencial é estimado em 143 GW (medido com torres de 50 m – atualmente as torres de medição são de 100 m – e excluindo o potencial offshore). Para se ter uma idéia da grandeza desse número, todo o parque gerador brasileiro tem capacidade instalada de

100 GW, incluindo todas as fontes. Analogamente ao panorama mundial, a expansão do parque eólico nacional depende de apoio governamental. No que concerne à indústria fornecedora de equipamentos para a geração eólica, o país conta somente com três empresas: Wobben Wind Power, Tecsis e South America Wind Energy, cujos principais clientes acham-se no exterior. Como 75% do custo de instalação de um parque eólico corresponde a equipamentos, a ampliação do leque de fornecedores é passo indispensável no sentido da competitividade. Vale recordar que a Alemanha, caso de referência nessa área, levou uma década para consolidar o seu mercado, reduzir custos e promover o desenvolvimento tecnológico. Como resultado, o custo de instalação de geradores eólicos no país ainda é elevado. Esse é um dos principais motivos para explicar a baixa adesão ao Proinfa e a falta de projetos eólicos no primeiro leilão de fontes alternativas realizado em 2010 (cerca de 639 MW foram negociados, sendo a maior parte térmicos). Das três vertentes energéticas do Proinfa – usinas a biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e aero geradores –, a terceira ainda tem o custo da energia gerada mais alto. Os geradores inscritos no Proinfa recebem de R\$ 219/MWh (US\$ 136,9/ MWh) a R\$ 234/ MWh (US\$ 146,2/ MWh), dependendo do fator de carga. Situam-se esses preços em patamares acima daqueles praticados em países de maior utilização de aero geradores.

De acordo com estudos realizados pelo Banco do Nordeste e apresentado pelo Presidente do banco no Fórum Nordeste 2008 “Desafios e oportunidades nos setores de biocombustíveis e energias limpas” (4/8/2010), apesar da energia eólica apresentar custo elevado quando comparado a geração por fontes convencionais, cerca de R\$ 200/MWh, ela pode contribuir para a modicidade tarifária no modelo elétrico brasileiro. Segundo o estudo daquela instituição, o custo médio das térmicas nos leilões de energia nova encontra-se na faixa de R\$ 140 /MWh; entretanto, o custo da energia térmica quando despachada depende do preço do combustível utilizado e, no contexto atual de insuficiência dos reservatórios hídricos, instabilidade no fornecimento de gás e alta dos preços das commodities, tem alcançado a média de R\$ 570/ MWh. Somente em 2008, o custo adicional decorrente do acionamento das usinas térmicas durante o primeiro semestre ultrapassou R\$ 1 bilhão para o sistema interligado nacional. É importante frisar que essa diferença de custo será repassada às tarifas de energia quando das revisões periódicas. Ou seja, apesar de possuir um custo de instalação superior ao das usinas térmicas, a geração eólica possui um custo de operação baixo, pois não paga pelo

combustível utilizado (vento). Assim, ao longo do tempo de operação, o custo da energia térmica cresce numa proporção tão superior do que o custo da energia eólica que a partir de um determinado ponto esta última se torna mais barata do que a térmica. Resulta dessa análise que o investimento em geração eólica é uma decisão relacionada com os resultados esperados para o sistema elétrico no médio/longo prazo, daí a importância do planejamento de longo prazo sobre a forma como se dará a expansão do sistema de geração elétrica nacional. Investir em energia eólica hoje pode representar a redução nos custos de geração futuros devido, entre outros fatores, à redução das emissões de gases de efeito estufa e à redução do uso de combustíveis fósseis. Neste último caso, em decorrência da substituição das térmicas. E devido à complementaridade entre os períodos de seca hídrica e de melhores ventos em várias regiões do Brasil, pode-se contribuir na otimização do uso dos reservatórios plurianuais.

### III.2) Dados Atuais da Condição Nacional.

Em 2011, o total de financiamentos aprovados para a geração eólica de energia foi de R\$ 3,4 bilhões, representando um crescimento de 173%, em relação a 2010. Foram financiados 43 parques eólicos, com capacidade instalada de 1.160 MW e investimento total da ordem de R\$ 5,3 bilhões. Cabe ressaltar que, com o sucesso dos leilões de fontes alternativas e de energia de reserva, e do 13º Leilão de Compra de Energia Elétrica Proveniente de Novos Empreendimentos de Geração (Leilão A-5, de 2011), a perspectiva é de um crescimento ainda mais expressivo em 2012.

É importante mencionar ainda que os parques eólicos apoiados pelo BNDES são desenvolvidos de forma a minimizar os impactos ambientais decorrentes de sua construção e a potencializar os benefícios advindos de sua implantação. São trabalhados sob a ótica da Política de Entornos do BNDES, com investimentos sociais que contribuem para o desenvolvimento territorial sustentável e que contam com a participação dos governos locais, sociedade local e demais lideranças que participaram na discussão de propostas dos investimentos e participam da implantação dos projetos.

Os contratos de financiamento celebrados entre o BNDES e os empreendedores responsáveis pela construção dos parques eólicos foram estruturados incluindo valores destinados a investimentos sociais, totalizando R\$ 26 milhões, a serem utilizados com o

intuito de promover, no âmbito da comunidade local: (a) formação de mão de obra especializada nas comunidades locais; (b) investimentos na infraestrutura local; (c) diversificação da economia local; (d) estímulo à atração de novas atividades econômicas nos municípios sede dos empreendimentos; e (e) investimentos em programas ambientais para conscientização das comunidades locais.

A maior parte dos empreendimentos eólicos será construída no semiárido nordestino, região cujo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) situa-se abaixo da média do Nordeste. Vislumbrando o potencial de crescimento da geração eólica no país, novos fabricantes de aero geradores credenciaram-se no cadastro de fabricantes do BNDES para fornecer equipamentos, nos níveis de nacionalização exigidos pelo BNDES, a saber: Acciona, Alstom, IMPSA, Gamesa, GE, Siemens, Suzlon, Vestas, Wobben e WEG. A presença desses novos fabricantes trouxe maior competitividade ao segmento de geração eólica, o que vem permitindo significativa redução do valor de investimento, por MW instalado e uma trajetória de queda de custos da energia comercializada, conforme pode ser verificado nos resultados dos últimos leilões de fontes alternativas e energia de reserva. O preço da energia comercializada, proveniente

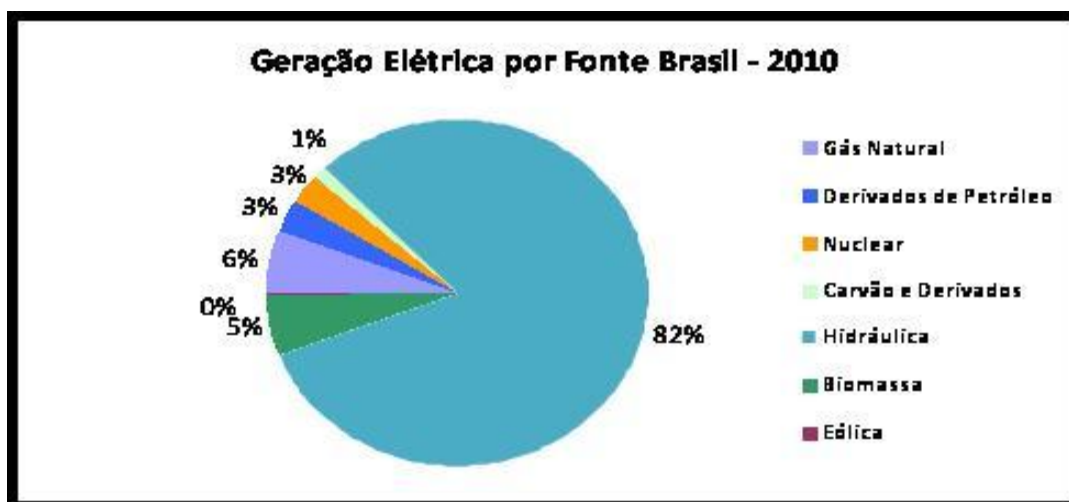


Figura 04- Geração de Energia Brasil 2010

### III.3) Futuro do Nosso Potencial Elétrico.

A energia eólica entrou definitivamente na matriz energética brasileira e deve crescer sete vezes em volume nos próximos três anos, saindo dos atuais 1.114 megawatts (MW) para 7.098 MW em 2014. A informação foi divulgada pelo presidente

da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Maurício Tolmasquim, durante a abertura do encontro Brazil Windpower, que prossegue até sexta-feira (2), reunindo técnicos, agentes públicos e empresários do setor.

O mundo todo está olhando para a questão da energia eólica no Brasil. Nós já temos um gigawatt (GW) instalado e vamos multiplicar por sete, que já estão contratados [em leilões] até 2014. É um crescimento bastante expressivo, disse Tolmasquim.

O presidente da EPE apresentou números que mostram a força do setor no Brasil, principalmente a partir de 2005, ano que marca a escalada do crescimento da produção eólica e a diminuição no preço do MW, que caiu de R\$ 300 na época para R\$ 99,50 no último leilão este ano.

A expansão vem atraindo grandes empresas estrangeiras. Atualmente, quatro grupos dividem o mercado, mas a previsão é que mais seis indústrias se instalem e comecem a produzir aqui os equipamentos até 2014. Ainda assim, segundo Tolmasquim, o Brasil ocupa apenas o 21º lugar no ranking dos países produtores de energia eólica, que tem a China em primeiro, seguida pelos Estados Unidos, a Alemanha e Espanha.

Para o secretário de Planejamento Energético do Ministério de Minas e Energia, Altino Ventura, o sucesso da energia dos ventos explica-se por vários fatores. A tecnologia evoluiu. As torres hoje são muito mais elevadas, saindo de 50 metros de altura no passado para até 120 metros de altura atualmente. A capacidade unitária dos geradores também aumentou e provocou uma redução de custos. A economia de escala, pelo fato de haver demanda para a energia eólica, também favoreceu essa competitividade. O Brasil tem hoje vários fabricantes operando em seu território, além de outros que vão se instalar aqui para atender não só o nosso mercado, mas também os clientes do exterior, disse.

O presidente da Associação Brasileira de Energia Eólica (Abeeólica), Ricardo Simões, previu que o desenvolvimento do setor vai gerar um grande volume de investimentos nos próximos anos. Atualmente o país conta com 57 parques eólicos em produção e tem 30 em construção.

Isto significa um investimento de R\$ 25 bilhões a R\$ 30 bilhões, e o setor eólico deve chegar em 2014 faturando mais de R\$ 3 bilhões por ano. Estamos em um processo de consolidação dessa indústria, com aumento de escala e ganho de competitividade. É um ciclo virtuoso, de uma energia limpa, renovável e sem emissão de gás do efeito estufa, disse Simões.

Segundo ele, há condições para o Brasil chegar nos próximos dez anos a 20 GW de produção de energia eólica. O volume equivale a uma vez e meia a capacidade total de produção da maior hidrelétrica do país, a Usina de Itaipu.

## **CAPITULO IV – O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA EÓLICO**

### **IV.1 ) Funcionamento Básico do Sistema Eólico.**

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

Na figura abaixo 05 podemos observar com clareza os principais componentes de um sistema de geração elétrica em que podemos destacar o gerador ,hélice, ventoinha torre.

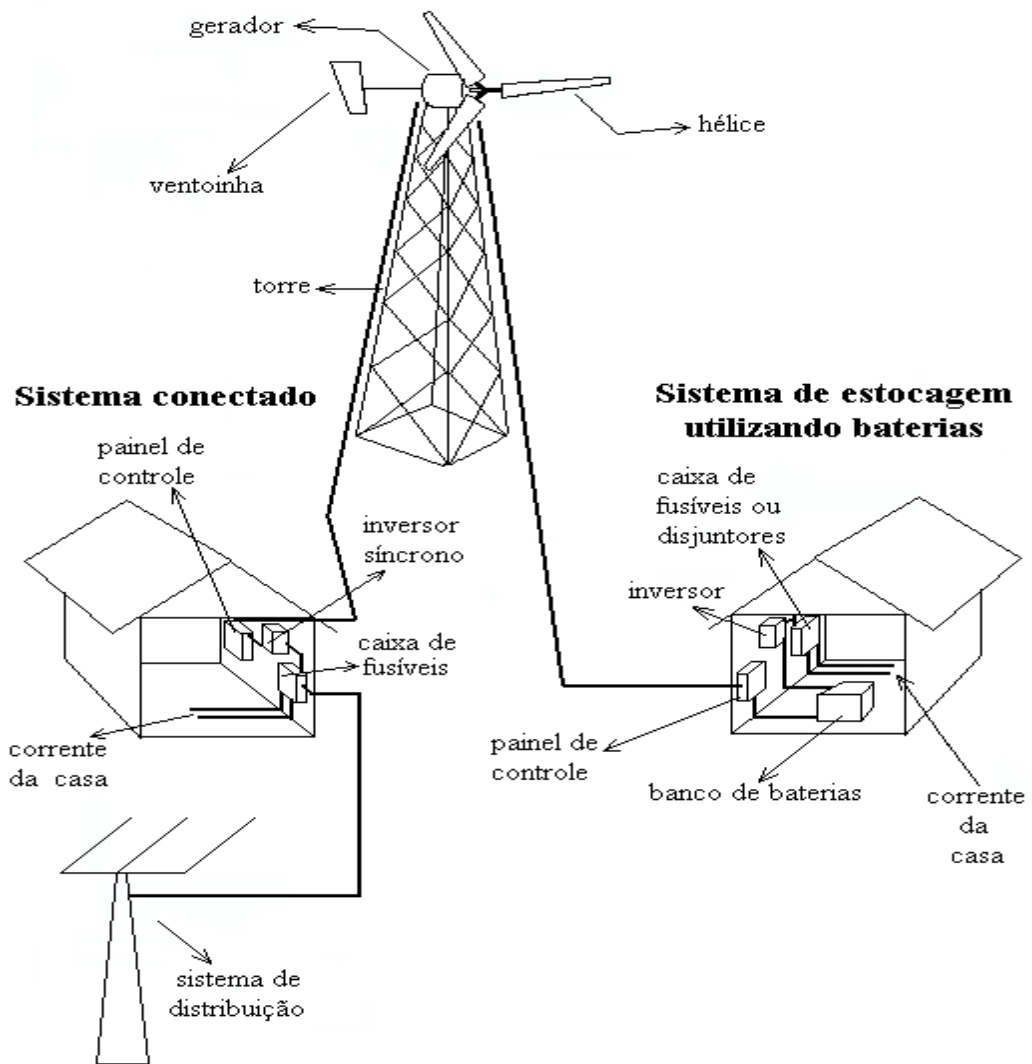


Figura 05- Sistema de Geração Eólica.

#### IV.2) Partes Principais de Um Gerador Eólico

- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.

- Transmissão e Caixa Multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga. Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga.
- Gerador Elétrico: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema de Armazenamento: Responsável por armazenar a energia para produção de energia firme a partir de uma fonte intermitente.
- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aereogenerador e a rede elétrica.

O rendimento global do sistema eólico relaciona a potência disponível do vento com a potência final que é entregue pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade; ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor (velocidade não perturbada) é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor (na esteira do rotor).

Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele, 59,3% da energia contida no fluxo de ar pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas, relacionadas com cada componente (rotor, transmissão, caixa multiplicadora e gerador). Além disso, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.

Todo sistema eólico somente começa a funcionar a partir de uma certa velocidade, chamada de velocidade de entrada, que é necessária para vencer algumas perdas. Quando o sistema atinge a chamada velocidade de corte um mecanismo de proteção é acionado com a finalidade de não causar riscos ao rotor e à estrutura.



Para os sistemas eólicos, a velocidade de rotação ótima do rotor varia com a velocidade do vento. Um sistema eólico tem o seu rendimento máximo a uma dada velocidade do vento (chamada de velocidade de projeto ou velocidade nominal) e diminui para velocidades diferentes desta. Projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada, supõe trabalhar no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação a curva de potência disponível do vento local. Isto requer encontrar uma relação de multiplicação, de maneira que se tenha um bom acoplamento rotor/carga. É necessário também, ter mecanismos de controle apropriados para melhorar o rendimento em outras velocidades de vento e aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico.

Um exemplo de mecanismo de controle é a utilização de rotores com ângulo de passo variável. Com este controle, a medida que a velocidade do vento varia, as pás mudam de posição, variando o rendimento do rotor. Com isto, pode-se aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico e ainda manter uma determinada velocidade de rotação, que corresponde a eficiência máxima do gerador.

Como uma primeira aproximação, o rendimento global de um sistema eólico simples pode ser estimado em 20%.

Na figura a seguir 06 podemos observar as partes principais de um gerador eólico para maior compreensão de seus componentes .

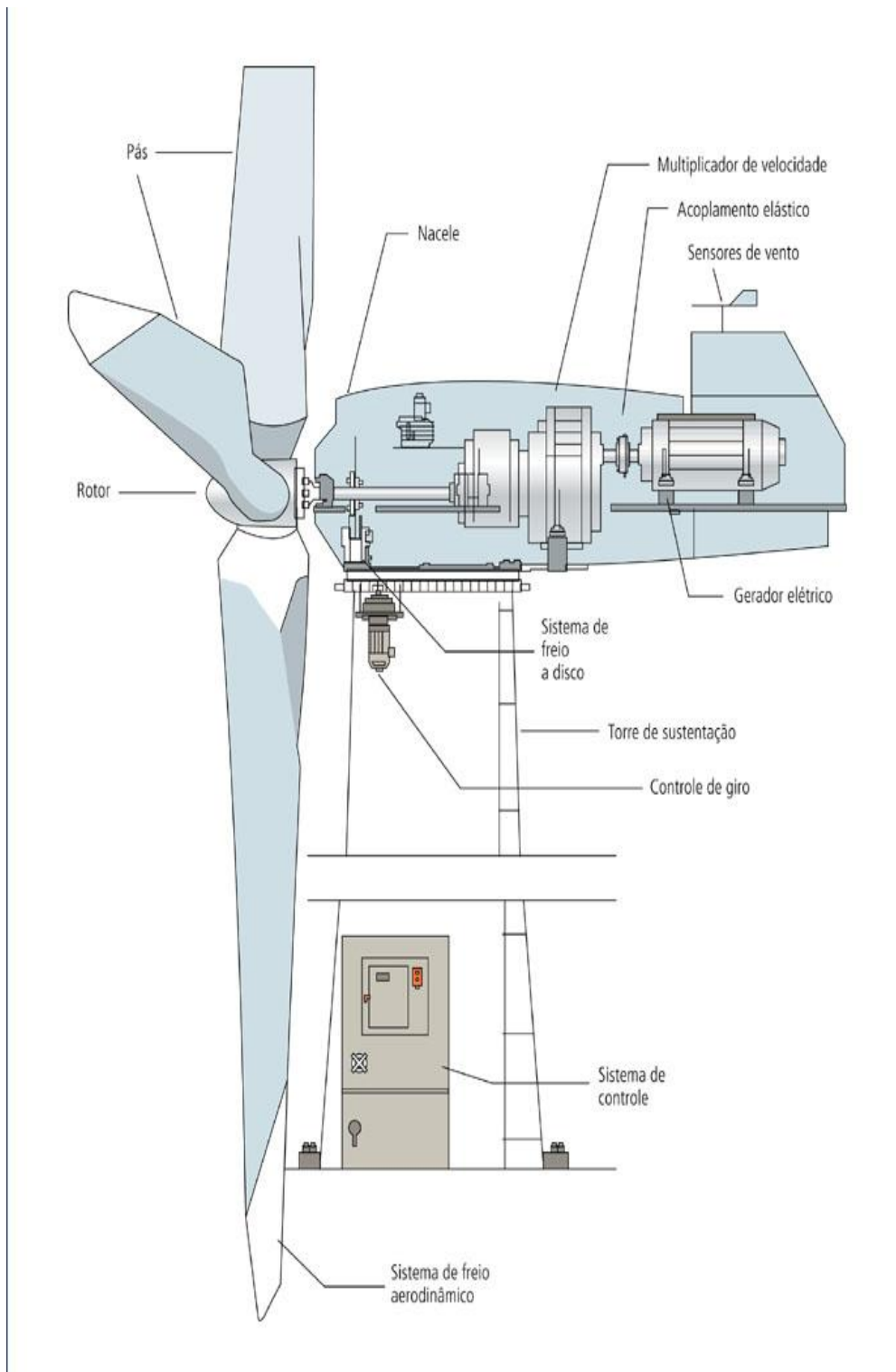


Figura 06 Partes principais do gerador eólico

#### IV.3) Estudo das Aplicações do Sistema Eólico.

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, conforme a aplicação, de uma unidade de armazenamento.

#### IV.3.1) Sistemas Isolados

Os sistemas isolados de pequeno porte, em geral, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados 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 ao sistema de bateria por sobrecargas ou descargas profundas. Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário a utilização de um inversor. Este inversor pode ser de estado sólido (eletrônico) ou rotativo (mecânico).

#### IV.3.2) Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geradores 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 e otimização dos fluxos energéticos na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio 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.

#### IV.3.3) Sistemas Interligados a Rede

Os sistemas interligados à rede não necessitam de sistemas de armazenamento de energia, pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão interligados. Os sistemas eólicos interligados à rede apresentam as vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuída tais como: a redução de perdas, o custo evitado de expansão de rede e a geração na hora de ponta quando o regime dos ventos coincide com o pico da curva de carga.

#### IV.4) Relação Entre Velocidade do Vento e Altura.

A velocidade do vento em um determinado local aumenta drasticamente com a altura. A extensão pela qual a velocidade do vento aumenta com a altura é governada por um fenômeno chamado "wind shear". Fricção entre ar mais lentos e mais rápidos conduz ao aquecimento, velocidade do vento mais baixa e muito menos energia de vento disponível perto do solo.

As regiões que possuem construções elevadas como prédios, só atingem velocidades razoáveis de vento após uma elevada altura. Já nas áreas em que só existem casas e pequenas construções, esta taxa diminui e assim, em alturas um pouco menores já temos ventos satisfatórios; no último caso mostrado, ao nível do mar, se vê que os ventos já são muito mais rápidos em altitudes menos elevadas que nos exemplos anteriores.

A potência teórica gerada pelas "máquinas de vento" varia com o cubo da velocidade do vento local. Isto, mais uma vez evidencia o quanto é necessário uma análise prévia do lugar onde se pretende instalar os equipamentos, para que se tenha um aproveitamento melhor da potencialidade da energia eólica. Assim, a conversão de energia eólica em regiões com muitos obstáculos fica prejudicada. Porém, mesmo nestas regiões é possível o aproveitamento, mesmo que já em escalas menores. O que é preciso saber é se nestas regiões onde há um aproveitamento mais restrito é ainda viável economicamente se construir tais equipamentos para se converter a energia eólica para eletricidade, por exemplo.

Existe uma regra prática que permite a utilização de cata-ventos em regiões que possuem construções e/ou obstáculos naturais, tais como árvores muito grandes ou elevações (morros) no solo. Esta regra diz que o cata-vento nestas regiões tem que ficar

a uma distância mínima de 7 vezes a altura que o obstáculo tem, ou seja, se numa casa de 5 metros de altura, por exemplo, se desejar implantar um sistema de captação e conversão da energia eólica, este sistema deverá estar a uma distância de 35 metros para que haja um aproveitamento melhor dos geradores e que as turbulências causada pela não uniformidade do chão, das construções e dos obstáculos naturais sejam minimizadas, não interferindo muito no aproveitamento do sistema.

#### IV.5 ) Geração Global dos Ventos.

Os ventos aliviam a temperatura atmosférica e as diferenças de pressão causadas pelo aquecimento irregular da superfície da Terra. Enquanto o sol aquece o ar, água e terra de um lado da Terra, o outro lado é resfriado por radiação térmica para o espaço.

Diariamente a rotação da Terra espalha esse ciclo de aquecimento e resfriamento sobre sua superfície. Mas, nem toda superfície da Terra responde ao aquecimento da mesma forma. Por exemplo, um oceano se aquecerá mais lentamente que as terras adjacentes porque a água tem uma capacidade maior de "estocar" calor.

Da diferença dentre as taxas de aquecimento e resfriamento são criadas enormes massas de ar com temperatura, mistura e características de massas de ar oceânicas ou terrestres, ou quentes e frias. A colisão destas duas massas de ar, quente e fria, geram os ventos da Terra.

#### IV.6 ) Os Geradores

A eletricidade é uma forma muito cômoda de se transmitir energia, assim, é importante falarmos um pouco sobre os instrumentos que fazem esta conversão, da energia mecânica - fornecida pelos ventos para a eletricidade, uma forma prática e limpa de se transmitir e usar a energia.

Esta conversão é feita pelos geradores elétricos, que nada mais são do que motores elétricos que ao girarem em torno de seus eixos induzem (pela lei de Faraday) uma corrente elétrica em seus polos. Existe uma gama muito grande de tipos e tamanhos de geradores usados hoje em dia. Para dar um exemplo bem conhecido, pode-se citar o alternador dos automóveis, que é um pequeno gerador que converte a energia mecânica rotativa do motor de combustão interna para eletricidade e carrega-a na bateria do automóvel, para ser utilizada em momentos posteriores.

Os geradores podem ser basicamente dos tipos "AC" ou "DC", se converterem a energia para a forma de corrente alternada ou contínua (direta), respectivamente. Nos tipos de geradores de corrente contínua (DC), a energia é convertida, como o nome já indica para a forma direta ou contínua de corrente elétrica e carrega uma bateria que acumula esta energia para uso posterior. Esta forma de conversão é um pouco incômoda, pois requer um banco relativamente grande de baterias para que se possa ter uma quantidade de energia razoável num determinado lugar. Além disto, os utensílios domésticos e a grande parte dos aparelhos elétricos e eletrônicos são projetados para funcionarem ligados a corrente alternada devido as facilidades de transporte que esta maneira proporciona.

Assim, nos sistemas em que se usam geradores de corrente contínua, é necessário que se tenha ligado juntamente ao sistema um inversor para que se possa utilizar diretamente aparelhos elétricos. Em compensação, esta forma permite que mesmo sem vento por algum tempo se tenha energia disponível.

Já os geradores de corrente alternada (AC), geram a eletricidade, como o nome diz, na forma de corrente alternada e pode ser usado diretamente nos aparelhos elétricos e eletrônicos do dia a dia. Existe, porém dois inconvenientes deste tipo de produção de eletricidade:

O primeiro é que não se é possível estocar energia na forma de corrente alternada, tendo que retificá-la por meio de diodos, por exemplo, para a forma contínua e armazená-la em bancos de baterias; o segundo inconveniente é que os geradores de corrente alternada geram correntes em frequências que variam com a velocidade de giro do rotor, e como os ventos variam muito, as frequências geradas pelo gerador também variam muito.

Para controlar este problema, visto que nosso sistema de energia tem que estar em torno de 60 Hz (Hertz), é preciso ligar ao sistema um dispositivo que mantenha a frequência em torno dos desejados 60 Hz; este dispositivo é chamado de inversor síncrono.

No sistema de estocagem utilizando baterias, a energia mecânica é convertida para eletricidade na forma de corrente contínua e carrega um banco de baterias. Deste

banco, a energia passa por um inversor que a deixa na forma de corrente alternada pronta para ser usada em suas aplicações.

No sistema conectado de energia, a conversão é feita diretamente para corrente alternada e passa por um inversor síncrono para que sua frequência seja ideal. Após isto, a corrente vai para a caixa de fusíveis e passa por um dispositivo seletor, que verifica se a corrente gerada pelo cata vento é suficiente para suprir as necessidades da casa; se for suficiente o dispositivo não atua, porém se a energia gerada pelo cata vento não for suficiente, este dispositivo seletor começa a "aceitar" também a energia fornecida pelo sistema de eletrificação das ruas. Desta maneira, o usuário deste sistema só usa a energia vinda da rua em situações em que o vento não é ideal ou quando sua demanda supera a energia gerada por seu equipamento.

#### IV7) Rotor Eólico

O rotor é o componente do sistema eólico responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica de rotação. É o componente mais característico de um sistema eólico. Por este motivo, a configuração do rotor influenciará diretamente no rendimento global do sistema.

Os rotores eólicos podem ser classificados segundo vários critérios e o mais importante é aquele que utiliza a orientação do eixo como fator de classificação. Assim, tem-se os rotores de eixo horizontal e os rotores de eixo vertical.

- 1- Cubo do rotor
- 2- Pás do rotor
- 3- Sistema hidráulico
- 4- Sistema de posicionamento da nacela
- 5- Engrenagem de posicionamento
- 6- Caixa multiplicadora de rotação
- 7- Disco de freio
- 8- Acoplamento do gerador elétrico
- 9- Gerador elétrico
- 10- Sensor de vibração
- 11- Anemômetro
- 12- Sensor de direção
- 13- Nacela, parte inferior
- 14- Nacela, parte superior
- 15- Rolamento do posicionamento
- 16- Disco de freio do posicionamento
- 17- Pastilhas de freio
- 18- Suporte do cabo de força
- 19- Torre

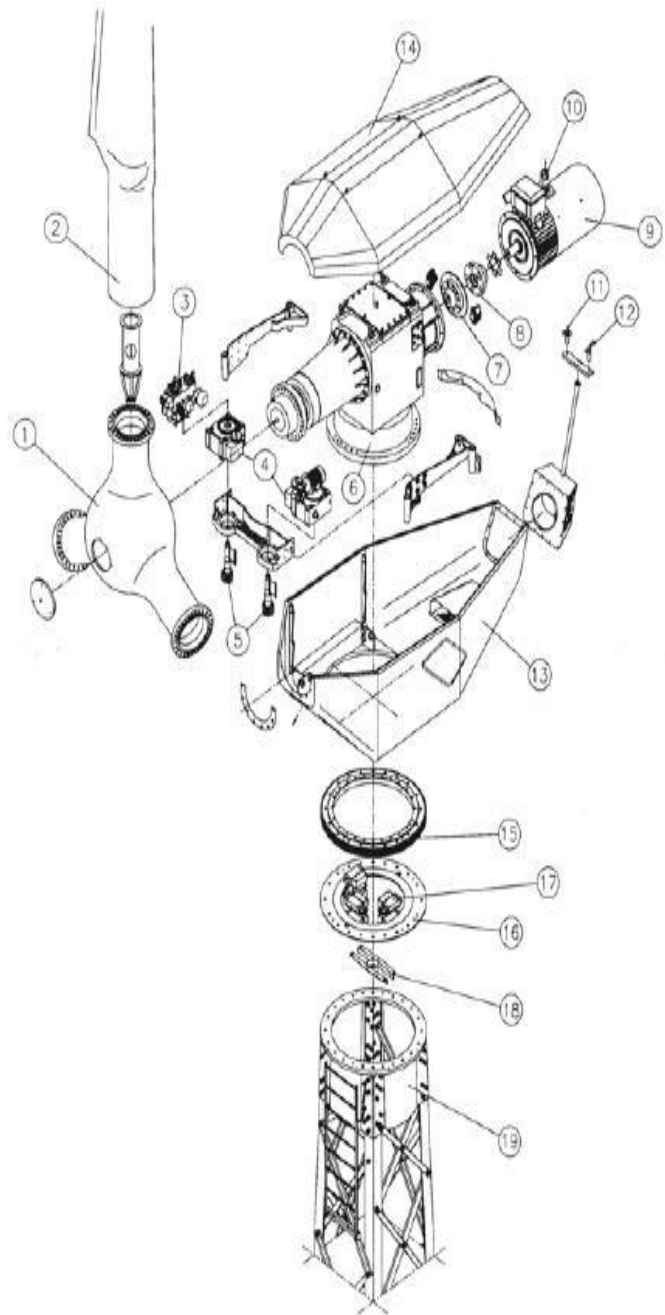


Figura 07 –Principais Partes de um Rotor.



#### IV.7.1) Rotor 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 (aero geradores 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.

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.

Quanto à posição do rotor em relação à torre, o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento ou a montante do vento. 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) uma ou duas pás.

#### IV.7.2) Rotor 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 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.

#### IV.8 ) Transmissão Mecânica

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.

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 aero geradores 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, utiliza-se geradores múltiplos de baixa velocidade e grandes dimensões.

#### IV.9 ) Os controles do sistema

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).

Devido a atuação das forças aerodinâmicas nas pás do rotor, uma turbina eólica converte a energia cinética do vento em energia mecânica rotacional. Estas forças aerodinâmicas são geradas ao longo das pás do rotor que necessitam de perfis especialmente projetados e que são muito similares àqueles usados para asas de aviões.

Com a velocidade do fluxo de ar aumentando, as forças de sustentação aerodinâmica aumentam com a segunda potência e a energia extraída da turbina com a terceira potência da velocidade do vento, uma situação que necessita de um controle de potência do rotor muito efetivo e rápido de modo a evitar sobre carregamento elétrico e mecânico no sistema de transmissão.

Os modernos aero geradores utilizam dois diferentes princípios de controle aerodinâmico para limitar a extração de potência à potência nominal do aero gerador. São chamados de controle estol (stall) e controle de passo (pitch). No passado, a maioria dos aero geradores 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

#### IV.10 ) Controle de Passo

O controle de passo 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.

Sob todas as condições de vento, o fluxo em torno dos perfis da pá do rotor é bem aderente à superfície 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 aero geradores.

Na Alemanha cerca de 50% de todos os aero geradores instalados são do tipo controle de passo porque dois dos maiores fabricantes preferem este tipo de controle de aero geradores. Na nova geração de turbinas da classe de megawatt, muitos fabricantes mudaram para sistemas de controle de passo.

#### IV.11) Controle de 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), 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.

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 ) 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. . Os aero geradores com controle estol, em comparação com os aero geradores com controle de passo 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 de uma velocidade constante do rotor, geralmente dada pelo gerador de indução diretamente acoplado à rede.

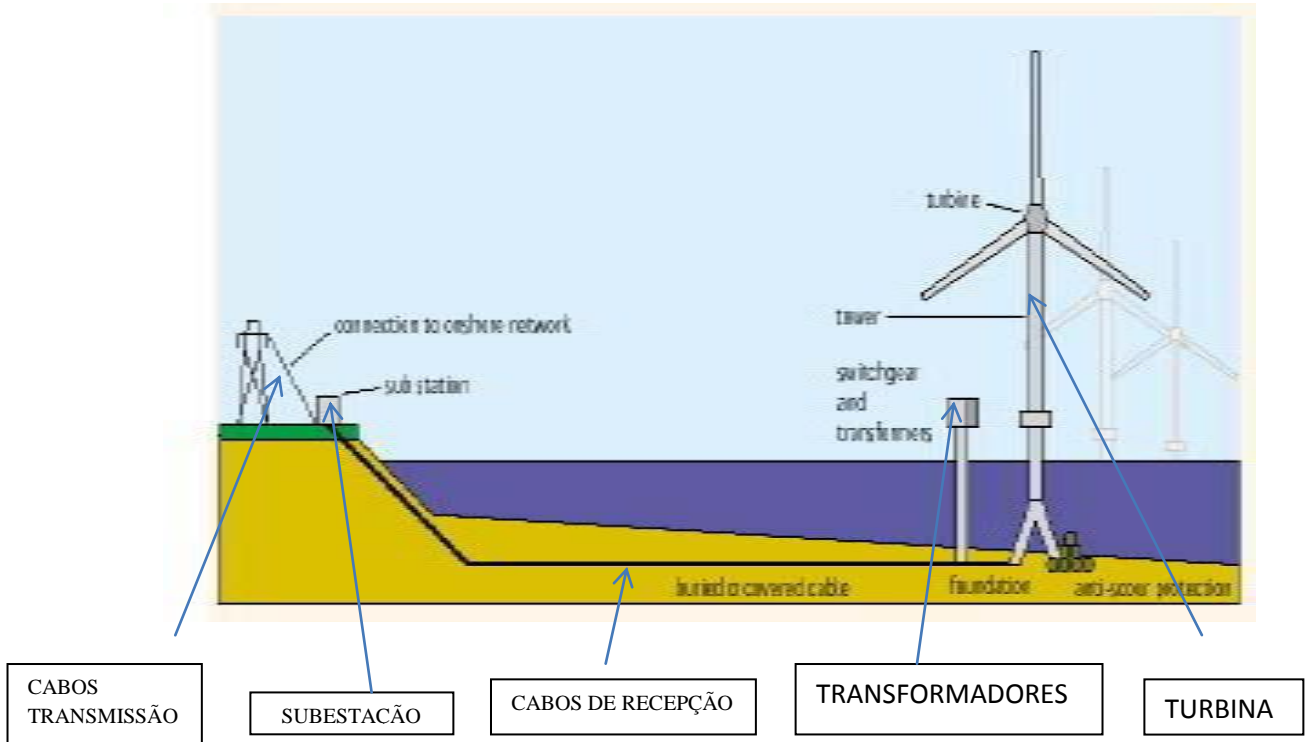
Mais recentemente surgiu uma concepção que mistura os mecanismos de controle por estol e de passo (denominada “estol ativo”). Neste caso, o passo da pá do rotor gira na direção do estol e não na direção da posição de embandeiramento (menor sustentação), como é feito em sistemas de passo normais. As vantagens deste sistema são:

- necessidade de reduzidas mudanças no ângulo do passo;
- possibilidade de controle da potência sob condições de potência parcial (baixas velocidades de vento);
- a posição de embandeiramento das pás do rotor para cargas pequenas em situação de altas velocidades de vento.

## Capítulo V – Captação Off-Shore

### V.1) Sistema off-shore esquema

Figura 08- Um típico sistema offshore.



Os elementos constituintes do sistema são:

Turbinas : Principal componente do sistema, aproveita a energia cinética dos ventos e a converte em energia elétrica.

Transformadores : Eleva a tensão fornecida pelas turbinas.

Cabos de recepção e transmissão : Fazem a conexão das turbinas com a sub estação e desta com a rede que esta em terra.

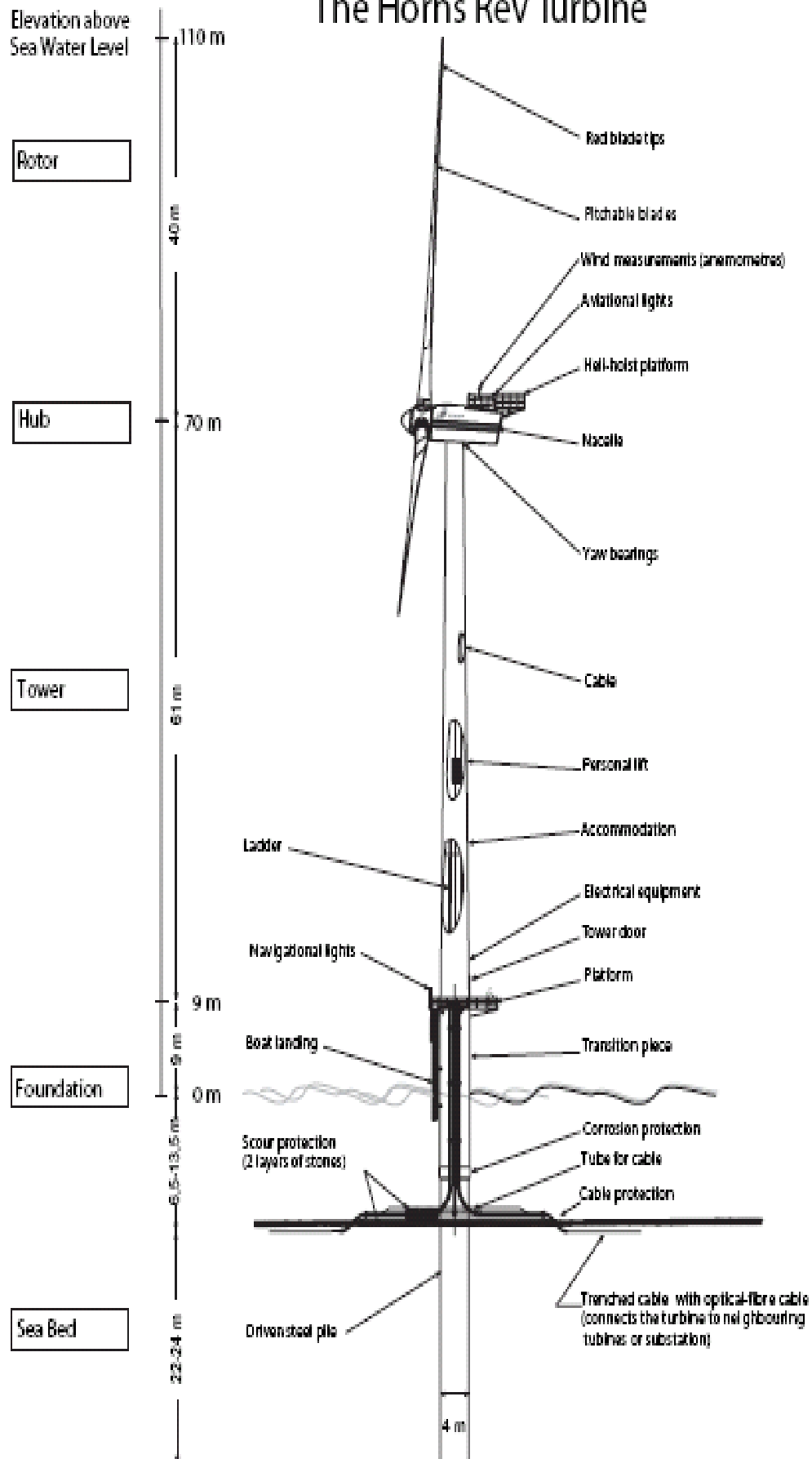
Subestação : Recolhe a energia elétrica produzida nas turbinas e a transmite para a rede. Pode ser dentro ou fora do mar.

Além desses elementos, um sistema offshore é também constituído de uma torre de transmissão meteorológica que coleta dados das condições meteorológicas do local da instalação, condições do mar e mede a velocidade do vento em diferentes alturas. Todas as informações coletadas servirão para monitoramento, análises e testes.

## V 2 ) As Turbinas Off-Shore.

As turbinas eólicas desenvolvidas para captação offshore são turbinas de grandes dimensões e grande capacidade, sendo maiores que as usadas em terra. Atualmente as maiores turbinas possuem uma potência de 5 MW e um diâmetro de aproximadamente 125 m. Na figura abaixo temos o exemplo de uma turbina essa turbina é uma Vestas V80 de 2 MW e com 80 m de diâmetro e chega a ter 22m de base sob água , usada no parque eólico de Horns Rev, na Dinamarca. Estas Turbinas tem provado cada vez mais suas excelentes performarces junto ao sistema off -shore ,impulsionando novos projetos e instalações em outros países da região como Suécia ,Finlândia e Dinamarca .

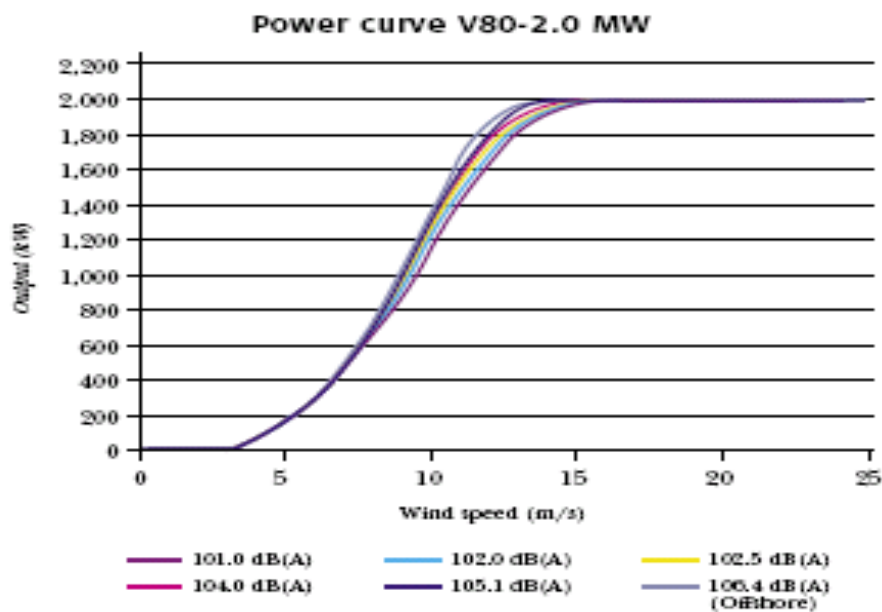
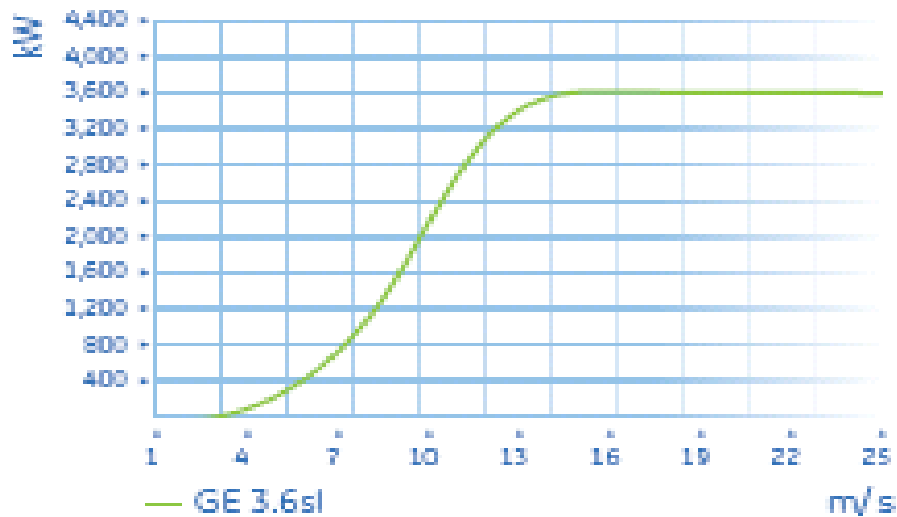
# The Horns Rev Turbine



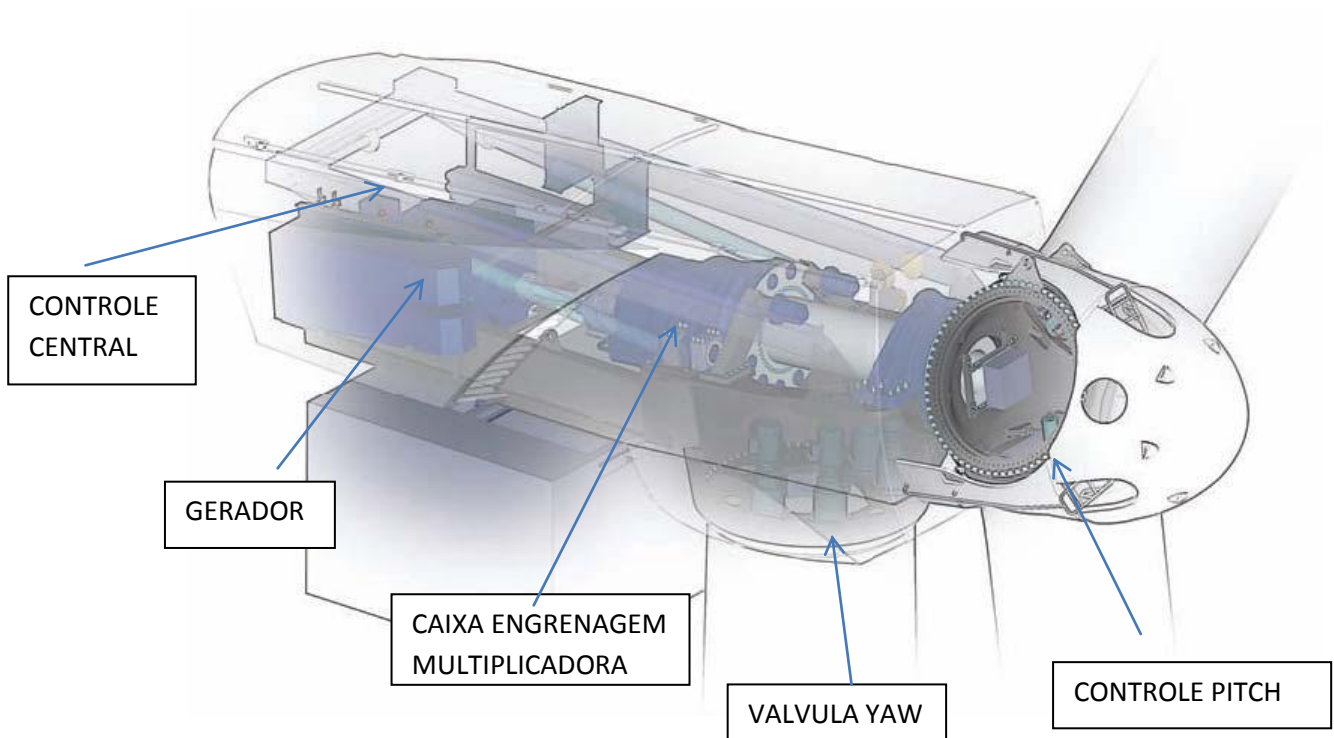


As figuras abaixo mostram a curva Velocidade X Potência de saída, de uma GE 3.6sl e uma Vestas V80, respectivamente.

### Power Curve



A parte superior da turbina abaixo é constituída por diversos sistemas de controle que estão interligados entre si. A figura mostra a parte interna de uma GE 3.6sl.



O controle yaw e o controle pitch, têm a função de fazer com que a turbina sempre trabalhe em uma condição de melhor aproveitamento.

A turbina precisa ficar sempre de frente ao vento, o controle yaw gira o rotor quando a direção do vento muda, permitindo que a turbina fique de frente ao vento. O controle pitch gira as pás quando a velocidade do vento varia, para assim ter um melhor aproveitamento.

### V.3) Formas de Sustentação.

A seguir são mostradas as formas pelas quais as turbinas são fixadas no fundo do mar, sendo a gravity e a monopile, as únicas usadas no momento.

#### Gravity

Possui uma base larga e tem um formato de uma taça cônica, que reduz os impactos das camadas de gelo sobre a turbina. Usada até 5 metros de profundidade.



**Gravity Foundation**

## Monopile

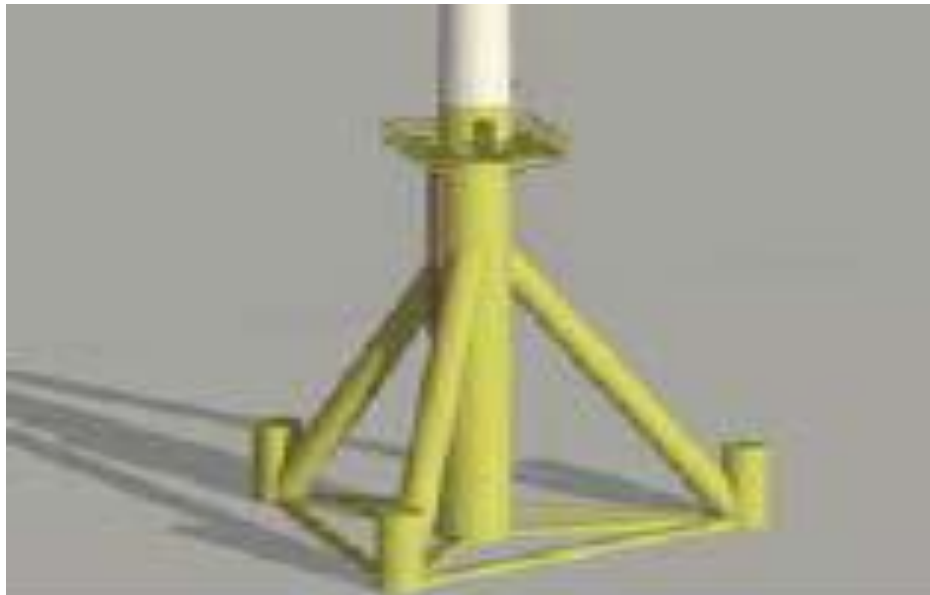
É a mais usada. Possui uma base mínima, e seu uso depende das propriedades do solo no fundo do mar. Profundidade limite de 30 metros.



## Monopile Foundation

## Tripod

Possui uma grande base, proposta de uso em águas profundas. Profundidades maiores que a monopile. Não há experiência com turbinas offshore, somente a concepção.



## Tripod/Truss Foundation

Flutuante

A turbina é ligada ao fundo do mar através de cabos. Proposta de uso em águas muito profundas. Não há experiência com turbinas offshore, somente a concepção.

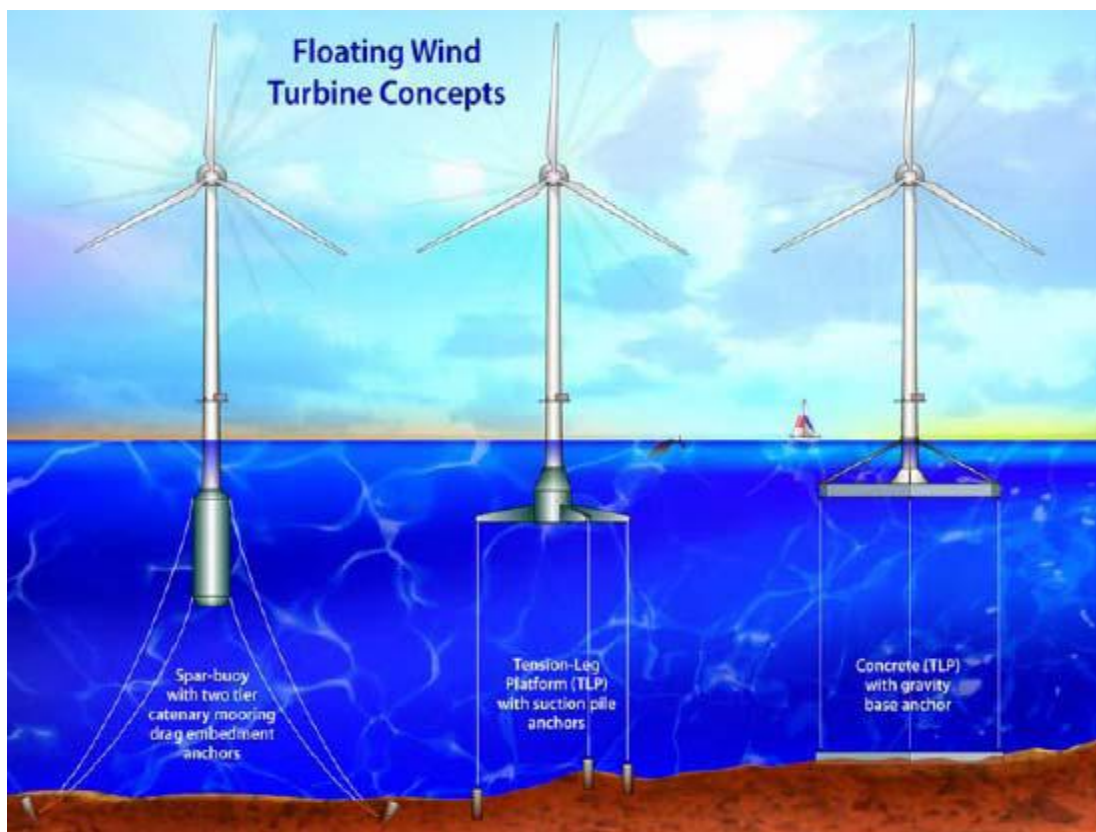


Figura 9 –Como é feita a ligação off-shore.

Abaixo mostra os tipos de sustentação com suas respectivas profundidades, como também, o aumento da energia disponível, à medida que se afasta da costa, captando energia em águas mais profundas. A figura refere-se ao potencial offshore dos Estados Unidos.



Figura 10 –Potencial Off-Shore nos EUA.

A superfície dos oceanos é muito lisa, e conseqüentemente a sua rugosidade é muito baixa, a rugosidade da superfície dos oceanos pertence à classe 0, a menor classe. A baixa rugosidade implicará em uma menor força de cisalhamento entre o vento e a superfície, resultando em uma maior velocidade do vento. A turbulência nos oceanos também é baixa, devido principalmente à pequena variação de temperatura entre as diferentes altitudes a partir da superfície dos oceanos (menor fluxo de calor turbulento (1), e a quase inexistência de obstáculos. A baixa turbulência irá resultar em ventos mais estáveis.

(1)- O fluxo de calor turbulento é resultante das flutuações de temperatura e velocidade, na direção vertical. Na convecção livre, tanto a flutuação de temperatura quanto a de velocidade, dependem do gradiente de temperatura na direção vertical, assim um maior gradiente de temperatura, corresponderá a uma maior flutuação de temperatura e velocidade.

Assim, as condições dos ventos nos oceanos são muito favoráveis, sendo mais velozes e estáveis do que na terra.

#### V.4 ). Vantagens da Captação Offshore

A captação offshore, devido as suas características e condições, apresenta certas vantagens, das quais podemos destacar :

- a) Melhor condição dos ventos ,Ventos mais velozes e estáveis
- b) Menor impacto visual e sonoro Por estarem localizadas longe da costa, o impacto visual e sonoro que as turbinas poderiam trazer, é reduzido consideravelmente.
- c) Menor risco de falha por fadiga devido à menor turbulência, as turbinas estão sujeitas a uma menor flutuação de esforços (2).
- d) Vasta disponibilidade, e podendo ser aproveitada em grandes áreas
- e) Menor restrição ao tamanho das turbinas, podendo usar turbinas de grandes dimensões
- f) Possibilidade de instalação próxima aos grandes centros consumidores
- g) Baixo impacto ambiental

#### V.5). Considerações a serem feitas antes da instalação

Para que um sistema offshore seja bem sucedido, determinadas considerações devem ser feitas, desde o projeto até a finalização em campo ,as observações e sutilezas da instalação devem estar de acordo com as legislações dentro de cada país seguindo muitas vezes as convenções internacionais ,podemos destacar algumas delas para melhor entendermos

- a) Verificar se haverá algum impacto a ecossistemas marinhos
- b) Rota de aves migratórias

(2) A falha por fadiga ocorre, quando os materiais estão sujeitos a esforços repetitivos, mesmo que estes sejam menores que a carga máxima suportada pelo material. Todas as turbinas trabalham sob a ação de esforços repetitivos, em virtude da ação constante dos ventos sobre as mesmas, mas a amplitude ou flutuação dos esforços acelera a tendência de falha por fadiga.

- c) Rota de navios e aviões
- d) Profundidade do mar
- e) Condições geológicas do fundo do mar
- f) Condições do clima, ventos e mar, no local de instalação.
- g) Atividade pesqueira
- h) Integração com rede elétrica

#### VI) Meio Ambiente.

O mais importante benefício ao meio ambiente da geração eólica é a não-emissão de dióxido de carbono na atmosfera. O dióxido de carbono é o gás com maior responsabilidade pelo agravamento do efeito estufa levando a mudança climática global a consequências desastrosas.

A moderna tecnologia eólica apresenta um balanço energético extremamente favorável e as emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com a fabricação, instalação e serviços durante todo ciclo de vida do aereo gerador são “recuperados” depois dos três a seis meses de fabricação.

Além do mencionado anteriormente, estes fatores também impulsionam a energia eólica:

- Reduz a dependência de combustíveis fósseis, sendo o vento um recurso abundante e renovável.
- As centrais eólicas ocupam um pequeno espaço físico e permitem a continuidade de atividades entre os aereo geradores (pastagens e agricultura).
- Melhora a economia local e oferta de empregos. Estudos realizados na Escócia calculam ser entre 500 a 1500 empregos associados a cada 0,3 a 1 GW de potência instalada.
- A emissão de poluentes é mínima, não contribuindo para a mudança climática global, chuva ácida, etc.



#### VI.1) As emissões de gases.

O mais importante benefício que a energia eólica oferece ao meio ambiente está no fato de que ela não emite poluentes ou CO<sub>2</sub> durante sua operação. Dessa forma, pode-se fazer um comparativo entre cada unidade (kWh) de energia elétrica gerada por turbinas eólicas e a mesma energia que seria gerada por uma planta convencional de geração de energia elétrica. Ao fazer essa análise chega-se à conclusão de que a energia eólica apresenta grandes vantagens na redução de emissão de gases de efeito estufa e na redução da concentração de CO<sub>2</sub> durante a sua operação<sup>1</sup>. Com o avanço de programas de eficiência energética, com o propósito de tornar mais eficiente o parque gerador de energia, as emissões de CO<sub>2</sub> e de gases de efeito estufa têm-se reduzido ao longo dos anos, mas permanecem, ainda, em uma faixa muito alta .

Preocupações com o crescimento da concentração de CO<sub>2</sub> e de gases de efeito estufa na atmosfera têm mobilizado vários países na busca de soluções efetivas para a redução das emissões nos próximos anos. A preocupação com o resultado futuro das emissões de gases de efeito estufa por parte de vários países do mundo têm criado um ambiente muito favorável ao uso da energia eólica como uma fonte renovável de energia. Uma turbina de 600kW, por exemplo, instalada em uma região favorável poderá, dependendo do regime de vento e do fator de capacidade, evitar a emissão de 20.000 a 36.000 toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalentes à geração convencional, durante seus 20 anos de vida útil estimado .

Os benefícios a serem obtidos na redução da emissão do dióxido de carbono no mix energético do país dependem de qual tipo de geração a energia eólica estará substituindo. Estudos realizados em 1993.

Produção de eletricidade nos próximos 20 anos com a contínua tendência do uso do gás em substituição ao carvão – é razoável considerar como um valor médio de 600 ton./ GWh a redução das emissões de dióxido de carbono pelo uso da geração eólica.

Somente as grandes hidrelétricas são competitivas comercialmente na atualidade. Entretanto, a utilização de grandes hidrelétricas tem sido discutida em países como o Canadá e o Brasil (que apresentam grandes plantas hidrelétricas instaladas cada vez mais longe dos centros consumidores) onde o apodrecimento da vegetação submersa nos grandes reservatórios produz uma quantidade substancial de gases de efeito estufa. Um dos principais gases proveniente da decomposição da vegetação submersa é o metano, cinquenta vezes mais potente que o CO<sub>2</sub>. Os projetos de grandes hidrelétricas estão sendo gradativamente abandonados devido à redução dos potenciais (locais onde poderiam ser implementados novos sistemas), aos impactos ambientais na vida animal, causados pelas mudanças de habitat e nos protestos de opinião pública.

#### VI.2) Impacto Sobre Fauna .

Pior preocupação relativa à fauna é com os pássaros, os quais podem vir a colidir com estruturas (torres de alta tensão, mastros, janelas de edifícios) e com as turbinas eólicas, devido à dificuldade de visualização. Outros motivos, como o tráfego de veículos em autoestrada e a caça, também são responsáveis pela morte dos pássaros.

Porém o comportamento dos pássaros e as taxas de mortalidade tendem a ser específicos para cada espécie e também para cada lugar. Estimativas de mortes de pássaros nos Países Baixos causadas por várias ações diretas e indiretas do homem, mostram que o tráfego de veículos apresenta uma taxa que, em comparação às estimativas de mortes por parque eólico de 1 GW, é cem vezes maior

Na Alemanha foi contabilizado um total de 32 pássaros mortos por turbinas eólicas entre os anos de 1989 e 1990, em todos os parques eólicos do país.

Em comparação a esse número, também foram computados os pássaros vitimados pelo impacto em torres de antenas. Encontrou-se, para o ano de 1989,

um total de 287 pássaros mortos na Alemanha devido a este fator

Fora das rotas de migração, os pássaros são raramente incomodados pelas turbinas eólicas. Estudos com radares em Tjaereborg, região oeste da Dinamarca, mostram que no local onde foi instalada uma turbina eólica de 2 MW, com 60 m de diâmetro, os pássaros tendem a mudar sua rota de voo entre 100 a 200 m, passando por

cima ou ao redor da turbina, em distâncias seguras. Esse comportamento tem sido observado tanto durante a noite quanto durante o dia. Na Dinamarca é comum um grande número de ninhos de falcões nas torres das turbinas eólicas .

### VI.3) Ruídos.

O impacto ambiental do ruído gerado pelo sistema eólico ao girar suas pás foi um dos mais importantes temas de discussão e bloqueio da disseminação da energia eólica durante a década de oitenta e início da década de noventa. O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, juntamente com as novas exigências de um mercado crescente e promissor, promoveram um avanço significativo na diminuição dos níveis de ruído produzido pelas turbinas eólicas. Este problema está relacionado com fatores como a aleatoriedade do seu funcionamento<sup>2</sup> e a variação da frequência do ruído uma vez que este se ajusta diretamente com a velocidade de vento incidente.

O ruído proveniente das turbinas eólicas tem duas origens: mecânica e aerodinâmica. O ruído mecânico tem sua principal origem da caixa de engrenagens, que multiplica a rotação das pás para o gerador. O conjunto de engrenagens funciona na faixa de 1.000 a 1.500 rpm, onde a vibração do mesmo é transmitida para as paredes onde é fixada. A transmissão de ruído mecânico também pode ser ocasionada pela própria torre, através dos contatos desta com as paredes. Com o avanço dos estudos a respeito do ruído mecânico gerado pelas turbinas eólicas, é possível a construção das mesmas com níveis de ruído bem menores, melhorando a tecnologia. Uma outra tecnologia utilizada em turbinas eólicas está no uso de um gerador elétrico multipolo conectado diretamente ao eixo das pás. Esse sistema de geração dispensa o sistema de engrenagens para multiplicação de velocidade, pois o gerador funciona mesmo em baixas rotações. Sem a principal fonte de ruído presente nos sistemas convencionais, as turbinas que empregam o sistema multipolo de geração de energia elétrica são significativamente mais silenciosas.

Muito esforço foi feito desde 1995 no desenvolvimento de uma geração de turbinas eólicas agora disponíveis no mercado. O desenvolvimento de tecnologias, ao longo dos últimos dez anos, na aerodinâmica das pás e nas partes mecânicas críticas, principalmente a caixa de engrenagem, tornou possível uma significativa redução dos níveis de ruído nas turbinas modernas.

#### VI.4) Impacto Visual.

As fazendas eólicas devem ser instaladas em áreas livres (sem obstáculos naturais) para que sejam comercialmente viáveis, sendo, desta forma, visíveis. A reação provocada por um parque eólico é altamente subjetiva. Muitas pessoas olham a turbina eólica como um símbolo de energia limpa sempre bem-vindo, outras reagem negativamente à nova paisagem.

Os efeitos do impacto visual têm sido minimizados, principalmente, com a conscientização da população local sobre a geração eólica. Através de audiências públicas e seminários, passa-se a conhecer melhor toda a tecnologia e, uma vez conhecendo-se os efeitos positivos da energia eólica, os índices de aceitação melhoram consideravelmente. Um caso especial sobre impacto visual causado pelas turbinas eólicas foi estudado na Fazenda Eólica de Cem mays, no Reino Unido. Essa fazenda foi uma das primeiras a ser construída no Reino Unido e é composta por 24 turbinas eólicas com uma capacidade total instalada de 7,2 MW. Foram feitas duas pesquisas nos anos de 1992 e 1994 onde, além dos impactos visuais, foram abordados impactos de ruído, econômicos, sociais, entre outros. A pesquisa foi feita com os moradores mais próximos à fazenda eólica num total de 134 pessoas. Na primeira etapa da pesquisa, apenas 4% dos pesquisados estavam preocupados com o impacto visual da fazenda eólica antes dela ser construída, mas diziam terem tido uma “agradável surpresa” após a construção. Na segunda fase da pesquisa, 6% manifestaram-se espontaneamente sobre o novo visual com as turbinas. Ao serem questionados sobre detalhes de aspectos visuais da fazenda eólica, 54% dos entrevistados responderam positivamente em relação às turbinas eólicas.

Metade das respostas mostraram fortes convicções quanto ao aspecto positivo da nova paisagem enquanto que a outra metade foi positiva com algumas reservas. Segundo a pesquisa, 27% mostraram-se indiferentes ao observarem a fazenda eólica e 12% responderam negativamente ao questionário. Um dado interessante é que 62% dos que responderam ao questionário tiveram grande interesse em descrever as turbinas (1996).

Um estudo conduzido pela AKF (1996), na Dinamarca, estimou os custos de som e impacto visual de turbinas eólicas - menos que US\$ 0,0012 por kWh de eletricidade produzido. O estudo foi primeiramente baseado em entrevistas com 342

peessoas que moravam próximas às turbinas eólicas e foram questionados quanto desejariam pagar para que as turbinas fossem removidas. Para checar os resultados das entrevistas, os preços de 74 casas situadas próximas às turbinas foram comparadas com similares situadas em qualquer outra parte.

Compreendendo os benefícios ambientais de energia eólica, a reação pública para uma fazenda eólica tende a melhorar. A indústria tem dedicado esforço considerável para integração cuidadosa de novos projetos dentro da paisagem.

## CONCLUSÕES

A energia eólica é uma das fontes renováveis que apresenta maiores vantagens na geração de energia elétrica. Em todo o mundo, o uso dessa energia na geração complementar de eletricidade tem sido constantemente difundido e se espera um crescimento ainda mais significativo para os próximos anos.

Na atual conjuntura, em que se deve produzir energia e ao mesmo tempo preservar o meio ambiente, e tendo em vista que são poucos os países que não são banhados pelo mar, a energia dos ventos oceânicos, definitivamente, não pode deixar de ser considerado

Desde os primeiros captadores de vento até os mais modernos aero geradores verifica-se que em toda a sua construção estão embutidos grandes conhecimentos de aerodinâmica até o monitoramento por softwares sofisticados

Mesmo apresentando, como toda tecnologia energética apresenta, algumas características ambientais desfavoráveis, conforme visto neste trabalho, o aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica deve ser encorajado e algumas destas características podem ser significativamente minimizadas e até mesmo eliminadas com planejamento adequado e inovações tecnológicas.

Em favor da utilização da energia eólica comparativamente as outras fontes podem ser destacados alguns aspectos. Por seu prazo de maturação ser menor ela se coloca como excelente alternativa quando existe a necessidade de acréscimo não oferta de energia no curto prazo. No aspecto relacionado a custos, mesmo que o custo unitário do megawatt gerado esteja acima das demais alternativas existe uma pequena vantagem comparativa com relação à flexibilidade de localização e distribuição do seu potencial geograficamente, fazendo com que o custo de inserção no sistema integrado seja menor.

Este presente trabalho não esgota o assunto .

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ) [www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/eolica/eolica.htm](http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/eolica/eolica.htm). Acesso em 15 de Maio de 2012

2 ) ANEEL. RELATÓRIO ANEEL 10 ANOS/AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – Agência Nacional de Energia Elétrica - Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br> > Acesso 13 de maio de 2012.

3 ) ANEEL. Atlas do potencial eólico brasileiro. Ed. Brasília: Aneel,

4) European Wind Energy Association – EWEA. Disponível em: <<http://www.ewea.org/>> GOLDENBERG, José; MOREIRA, José Roberto. Política energética no Brasil. Estudos Avançados, vol. 19 no 55, 2009. Acesso 02 de Julho 2012

5) MASSACHUSETTS TECHNOLOGY COLLABORATIVE. A Framework for Offshore Wind Energy Development in the United States. Disponível em :[www.mtpc.org/renewable energy/press/pr\\_9\\_30\\_05\\_wind.htm](http://www.mtpc.org/renewable%20energy/press/pr_9_30_05_wind.htm)> Acesso em 22 de Junho 2012

6) BUTTERFIELD, S., RAM, B., MUSIAL, W. U.S Offshore Technology Overview. Disponível : [www.eere.energy.gov/windandhydro/windpoweringamerica/pdfs/workshops/2007\\_sumit/butterfield.pdf](http://www.eere.energy.gov/windandhydro/windpoweringamerica/pdfs/workshops/2007_summit/butterfield.pdf) > Acesso em 22 Junho 2012.

7) AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Banco de Informações de Geração (BIG). Evolução da Capacidade Instalada (2001 à 2010). Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/EVOLUCAO\\_DA\\_CAPACIDADE\\_IN\\_TALADA\\_ANEEL\\_MME.PDF](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/EVOLUCAO_DA_CAPACIDADE_IN_TALADA_ANEEL_MME.PDF)>. Acesso em 17 de Junho 2012.

8 ) CRESESB (CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO). Energia Eólica: Princípios e Tecnologia. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em 14 maio 2012.

9) Energia Eólica. <http://energiaeolica.predialnet.com.br/lado.htm>, Acesso em 14 junho 2012.

10) TESSMER, Hélio. Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem. Novo Hamburgo, 2002. Disponível em: <<http://www.liberato.com.br/upload/arquivos/0131010716090416.pdf>>. Acesso em 20 maio. 2012.