



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

## Energia Eólica: Estudo de Caso do Parque Vale dos Ventos.

Trabalho de Conclusão de Curso

Aluno: Diego José de Castro Moreira  
Orientador: Leimar Oliveira

Campina Grande  
Fevereiro de 2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

## Energia Eólica: Estudo de Caso do Parque Eólico Vale dos Ventos

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

---

Diego José de Castro Moreira  
Aluno

---

Prof. Leimar Oliveira  
Orientador

---

Prof. Luís Reyes Rosales Montero  
Convidado

Campina Grande – Fevereiro de 2009

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, por me proteger e iluminar meu caminho sempre.

Aos meus pais José Edvan Moreira Gonçalo e Edllamarr de Castro Moreira, meus irmãos Ícaro, Emanuele e Arthur. Minha família linda e única que amo tanto. Sem o apoio de vocês com certeza não chegaria até aqui.

A minha namorada Gracyelle Alves Remígio que sempre esteve, está e estará ao meu lado me apoiando, me incentivando, enfim sempre torcendo por mim.

Aos meus grandes amigos em especial Manoel Sátiro, Marcus Vinícius, Éder, Fabiano, Marcéu, Joálison, Zé Filho, Zizo, Vertim, Antonildo, Allan, Byh, Cahah, Einstein, Luana que nesses cinco anos de faculdade sempre me incentivaram, e estiveram do meu lado nos momentos felizes e tristes. Aos meus amigos que conquistei ao longo dessa vida.

A todos meus professores que desde 1988 me ensinaram a valorizar o que de mais importante podemos aprender e praticar, a “Educação”.

Aos Engenheiros Alfredo de Carvalho Filho, Luís Alberto e Leonardo Medeiros pela oportunidade e apoio.

Aos colegas de trabalho no Estágio, obrigado pelos conhecimentos passados.

Ao Prof. Leimar Oliveira, obrigado pela orientação e pela oportunidade.

## **DEDICATÓRIA**

Ao meu avô,  
Manoel Gonçalo da Silva e  
A minha avó Ester Moreira Gonçalo.

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<i>Pág.</i>
<i>Figura 1 - Exemplos de Turbinas Eólicas (Pequena, Média e Grande Porte)</i>	06
<i>Figura 2 - Turbinas Eólicas de Eixo Vertical</i>	06
<i>Figura 3 - TEEV do Projeto Darrius</i>	07
<i>Figuras 4 – Componentes TEEH</i>	08
<i>Figura 5 - Aerodinâmica da Turbina</i>	09
<i>Figura 6 - Turbina Eólica Residencial e Turbina Eólica em Escala de Geração Pública</i>	12
<i>Figura 7 – Fazenda Eólica de Raheenleagh</i>	14
<i>Figura 8 – Velocidade Média do Vento a 50m de Altura</i>	18
<i>Figura 9 – Pot. Eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7 m/s</i>	19
<i>Figura 10 – Sistema de Interligação dos Dez Sub-Parques do Complexo Eólico VDV</i>	30
<i>Figura 11 – Desenho do Sistema Interno E-48</i>	31
<i>Figura 12 – Exemplo do Tipo de Fundação para Aerogerador</i>	34

<b>LISTA DE TABELAS</b>	<i>Pág.</i>
<i>Tabela 01 – Tamanho do Rotor / Geração Máxima de Potência</i>	11
<i>Tabela 02 – Comparação de Custos de Energia / EUA</i>	15
<i>Tabela 03 – Definição das Classes de Energia</i>	19
<i>Tabela 04 – Usinas Eólicas / Potência / Município</i>	20
<i>Tabela 05 – Energia Eólica – Capacidade Instalada no Mundo (MW)</i>	22
<i>Tabela 06 – Valores convencionais de acionamentos das proteções para sobre e sub-tensões em sistemas de controle de turbinas eólicas</i>	27

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Motivação</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
<b>CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Introduções a Energia Eólica no Brasil e no Mundo</i>	3
2.2 <i>Turbinas Eólicas / Aerogeradores</i>	3
2.3 <i>Tecnologias de Aproveitamento – Turbinas Eólicas / Aerogeradores</i>	4
2.4 <i>Fatores Econômicos – Energia Eólica</i>	12
2.4.1 <i>Custo da Energia Eólica</i>	15
2.5 <i>Impactos Socioambientais</i>	16
2.6 <i>Perspectivas Futuras</i>	16
<b>CAPÍTULO 3. POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO / MUNDIAL</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Panorama do Potencial Eólico Brasileiro</i>	17
3.2 <i>Potencial Eólico Mundial – Capacidade Instalada</i>	21
<b>CAPÍTULO 4. PROJETO ELÉTRICO DE CENTRAIS EÓLICAS</b>	<b>22</b>
4.1 <i>Caracterização do Local da Instalação</i>	22
4.2 <i>Caracterização das Turbinas Eólicas</i>	24
4.3 <i>Dimensionamento Principal</i>	25
4.3.1 <i>Potência e Corrente de Projeto</i>	25
4.4 <i>Sistemas de Proteção</i>	26
4.4.1 <i>Sobre e Sub-Tensão</i>	26
4.4.2 <i>Curto-Circuito / Sobre-Corrente</i>	27
4.4.3 <i>Sobre-Frequência e Sub-Frequência</i>	28
4.4.4 <i>Pára-Raios</i>	28
4.5 <i>Aterramento do Transformador Elevador</i>	29

<b>CAPÍTULO 5. ESTUDO DE CASO DO PARQUE EÓLICO VDV</b>	<b>29</b>
<i>5.1 Configurações do Empreendimento</i>	29
<i>5.2 Descrições do Sistema dos Aerogeradores</i>	30
<i>5.3 Descrição do Sistema de Gerenciamento da Rede</i>	31
<i>5.4 Descrição do Sistema de Segurança</i>	31
<i>5.4.1 Sistema de Freio</i>	31
<i>5.4.2 Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas</i>	32
<i>5.4.3 Sistemas de Sensores</i>	32
<i>5.5 Sistema de Controle</i>	33
<i>5.6 Descrição da Rede Elétrica Subterrânea Interna</i>	33
<i>5.7 Características Gerais da Fundação</i>	34
<i>5.8 Considerações Finais – Parque Eólico VDV</i>	38
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES</b>	<b>35</b>
<b>CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>36</b>

## **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

### ***1.1 Motivação***

O presente estudo tem como centro de interesse abordar as noções básicas da Energia Eólica, desde as tecnologias de aproveitamento das Turbinas Eólicas à análise sucinta do Potencial Eólico, tanto no Brasil como no mundo. Também serão mensuradas as definições básicas referentes ao Projeto Elétrico de uma Central Eólica.

No tocante a essência primordial desse trabalho, será apresentado um estudo de caso do Parque Eólico Vale dos Ventos, tomando como referência todos os conceitos e definições anteriormente citados.

Seguindo a linha de pesquisa bibliográfica, será primeiramente citado as noções básicas dessa fonte alternativa de energia, apresentando um panorama da mesma tanto no Brasil como no mundo. Dando sequência com o capítulo dois, será abordado as definições básicas das Turbinas Eólicas ou Aero geradores, salientado suas mais modernas e atuais tecnologias de aproveitamento. Outro aspecto que é importante ressaltar, consiste na abordagem econômica dessa fonte de energia tomando como comparação as outras fontes energéticas. Finalizando o capítulo dois, será mostrado um diagnóstico dos Impactos Socioambientais com uma previsão futurista mundial da evolução desse segmento como fonte alternativa de energia.

Uma análise do potencial eólico será abordado no capítulo três, tomando como referência o Brasil, partindo dos resultados dos estudos realizados em 1998 pela CBEE, que resultou no Atlas Eólico Brasileiro. Um panorama da capacidade instalada também será apresentado. É importante ressaltar que o potencial eólico brasileiro está em torno de 143,5 GW. Uma análise mundial também foi abordada, mensurando as capacidades instaladas das principais nações desde o ano de 1997 até 2002.

O capítulo quatro apresenta os principais métodos para realização de um Projeto Elétrico de uma Central Eólica. Abordando as ferramentas utilizadas para estimar o impacto de centrais eólicas na qualidade de energia local, como também o funcionamento das turbinas eólicas e as análises de proteção para evitar operações indevidas.

O quinto capítulo finaliza com um Estudo de Caso do Parque Eólico Vale dos Ventos situado no município de Mataraca no estado da Paraíba. Onde será ressaltado a

capacidade instalada, as características e o número de aerogeradores, como também os equipamentos utilizados na execução do projeto.

### ***1.2 Objetivos***

Este trabalho visa oferecer conhecimentos sobre os princípios fundamentais do uso da Energia Eólica, bem como suas aplicações atreladas às tecnologias desenvolvidas atualmente em prol da modernização tecnológica desta fonte alternativa de energia. Além de apresentar um diagnóstico ou mais precisamente um Estudo de Caso do Parque Vale dos Ventos situado no município de Mataraca no estado da Paraíba.



## **CAPÍTULO 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### *2.1 Introdução a Energia Eólica*

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

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial. [1]

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

### *2.2 Turbinas Eólicas / Aerogeradores*

A energia eólica é aproveitada pela transformação da energia cinética dos ventos em energia elétrica, no caso de uma turbina eólica, as pás da turbina são projetadas para capturar a energia cinética contida no vento. A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica urbana foi instalada em 1976, na Dinamarca. Hoje em dia, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo.

Atualmente a turbina eólica utilizada é um equipamento de grandes dimensões - turbinas de geradores eólicos mais modernos chegam a medir 60 metros e pesar mais de 20 toneladas cada uma – formado essencialmente por um conjunto de duas ou três pás, com

perfis aerodinâmicos eficientes, que impulsionadas pela força dos ventos, aciona geradores que operam a velocidades variáveis, para garantir uma alta eficiência de conversão. [1]

A instalação de turbinas eólicas normalmente apresenta viabilidade econômica em locais em que a velocidade média anual dos ventos seja superior a 3,6 m/s. Existem atualmente, mais de 30 000 turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, principalmente nos Estados Unidos. A turbina de energia eólica mais simples possível consiste em três partes fundamentais:

- **Pás do rotor:** as pás são, basicamente, as velas do sistema. Em sua forma mais simples, atuam como barreiras para o vento (projetos de pás mais modernas vão além do método de barreira). Quando o vento força as pás a se mover, transfere parte de sua energia para o rotor;
- **Eixo:** o eixo da turbina eólica é conectado ao cubo do rotor. Quando o rotor gira, o eixo gira junto. Desse modo, o rotor transfere sua energia mecânica rotacional para o eixo, que está conectado a um gerador elétrico na outra extremidade;
- **Gerador:** na essência, um gerador é um dispositivo bastante simples, que usa as propriedades da indução eletromagnética para produzir tensão elétrica - uma diferença de potencial elétrico. A tensão é, essencialmente, "pressão" elétrica: ela é a força que move a eletricidade ou corrente elétrica de um ponto para outro. Assim, a geração de tensão é, de fato, geração de corrente. Um gerador simples consiste em ímãs e um condutor. O condutor é um fio enrolado na forma de bobina. Dentro do gerador, o eixo se conecta a um conjunto de ímãs permanentes que circunda a bobina. Na indução eletromagnética, se você tem um condutor circundado por ímãs e uma dessas partes estiver girando em relação à outra, estará induzindo tensão no condutor. Quando o rotor gira o eixo, este gira o conjunto de ímãs que, por sua vez, gera tensão na bobina. Essa tensão induz a circulação de corrente elétrica (geralmente corrente alternada) através das linhas de energia elétrica para distribuição.

### *2.3 Tecnologias de Aproveitamento – Turbinas Eólicas / Aero geradores*

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos – eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono etc. Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de turbinas eólicas

com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não-flexível.

Entretanto, algumas características desse projeto ainda geram polêmica, como a utilização ou não do controle do ângulo de passo (pitch) das pás para limitar a potência máxima gerada. A tendência atual é a combinação das duas técnicas de controle de potência (stall e pitch) em pás que podem variar o ângulo de passo para ajustar a potência gerada, sem, contudo, utilizar esse mecanismo continuamente (WIND DIRECTIONS, 2000).

Quanto à capacidade de geração elétrica, as primeiras turbinas eólicas desenvolvidas em escala comercial tinham potências nominais entre 10 kW e 50 kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100 kW a 300 kW. Em 1995, as maiorias dos fabricantes de grandes turbinas ofereciam modelos de 300 kW a 750 kW. Em 1997, foram introduzidas comercialmente as turbinas eólicas de 1 MW e 1,5 MW, iniciando a geração de máquinas de grande porte. Em 1999 surgiram as primeiras turbinas eólicas de 2 MW e hoje existem protótipos de 3,6 MW e 4,5 MW sendo testados na Espanha e Alemanha. A capacidade média das turbinas eólicas instaladas na Alemanha em 2002 foi de 1,4 MW e na Espanha de 850 kW. Atualmente, existem mais de mil turbinas eólicas com potência nominal superior a 1 MW em funcionamento no mundo.[2]

Quanto ao porte, as turbinas eólicas podem ser classificadas da seguinte forma (Figura 1): *pequenas* – potência nominal menor que 500 kW; *médias* – potência nominal entre 500 kW e 1000 kW; e *grandes* – potência nominal maior que 1 MW. Nos últimos anos, as maiores inovações tecnológicas foram à utilização de acionamento direto (sem multiplicador de velocidades), com geradores síncronos e novos sistemas de controle que permitem o funcionamento das turbinas em velocidade variável, com qualquer tipo de gerador. A tecnologia atual oferece uma variedade de máquinas, segundo a aplicação ou local de instalação. Quanto à aplicação, as turbinas podem ser conectadas à rede elétrica ou destinadas ao suprimento de eletricidade a comunidades ou sistemas isolados. Em relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme (como exemplo, turbina de médio porte da Figura 1) ou *off-shore* (como exemplo, turbinas de grande porte da Figura 1). [2]



Figura 1 – Exemplos de Turbinas Eólicas (Pequena, Média e Grande Porte).

Quando se trata de turbinas eólicas modernas, há dois projetos principais: as de eixo horizontal e as de eixo vertical. Turbinas eólicas de eixo vertical (**TEEVs**) são bastante raras. A única em produção comercial atualmente é a turbina Darrieus, que se parece um pouco com uma bateadeira de ovos.



Figura 2 - Turbinas Eólicas de Eixo Vertical

Em uma TEEV, o eixo é montado na vertical, perpendicular ao solo. Como as TEEVs estão permanentemente alinhadas com o vento (ao contrário das de eixo horizontal), nenhum ajuste é necessário quando a direção do vento muda. Entretanto, uma TEEV não pode começar a se mover por si mesma: ela precisa de um impulso de seu sistema elétrico

para dar partida. Em vez de uma torre, ela geralmente usa cabos de amarração para sustentação, pois assim a elevação do rotor é menor. Como menor elevação significa menor velocidade do vento devido à interferência do solo, as TEEVs geralmente são menos eficientes que as TEEHs. Como vantagem, todos os equipamentos se encontram ao nível do solo para facilidade de instalação e serviços. Mas isso significa uma área de base maior para a turbina, o que é uma grande desvantagem em áreas de cultivo.

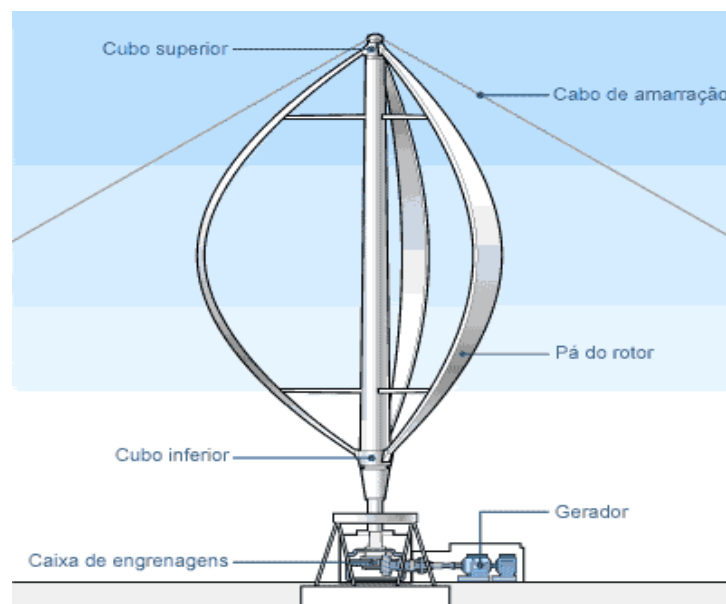


Figura 3 - TEEV de Projeto Darrieus

As TEEVs podem ser usadas para turbinas de pequena escala e para o bombeamento de água em áreas rurais, mas todas as turbinas de escala de geração pública produzidas comercialmente são turbinas eólicas de eixo horizontal (**TEEHs**).

Como o nome indica, o eixo da TEEH é montado horizontalmente, paralelo ao solo. As TEEHs precisam se alinhar constantemente com o vento, usando um mecanismo de ajuste. O sistema de ajuste padrão consiste de motores elétricos e caixas de engrenagens que movem todo o rotor para a esquerda ou direita em pequenos incrementos. O controlador eletrônico da turbina lê a posição de um dispositivo cata-vento (mecânico ou eletrônico) e ajusta a posição do rotor para capturar o máximo de energia eólica disponível. As TEEHs usam uma torre para elevar os componentes da turbina a uma altura ideal para a velocidade

do vento (e para que as pás possam ficar longe do solo) e ocupam muito pouco espaço no solo, já que todos os componentes estão a até 80 metros de altura.

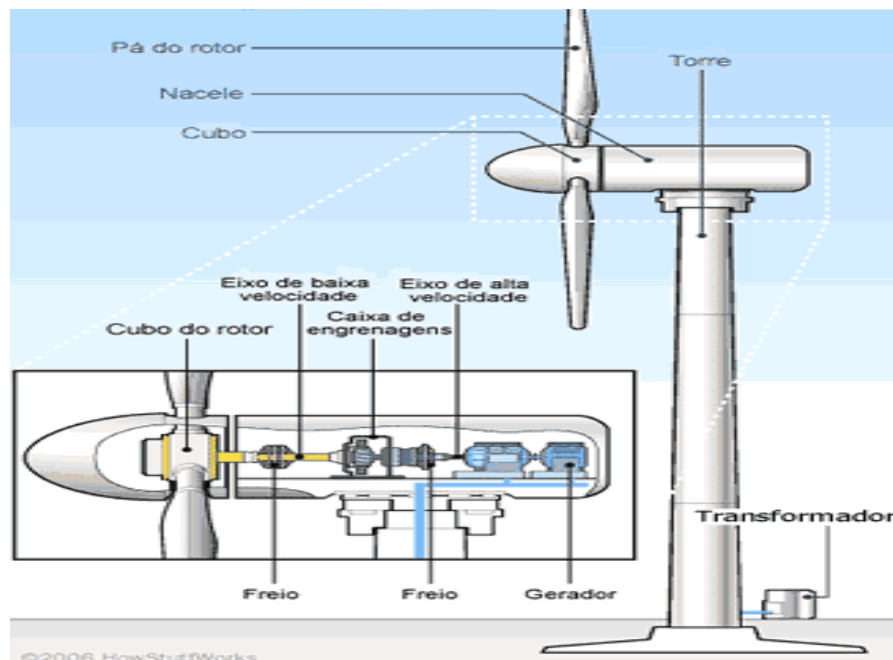


Figura 4 – Componentes TEEH

Componentes de uma grande TEEH:

- **Pás do rotor:** capturam a energia do vento e a convertem em energia rotacional no eixo;
- **Eixo:** transfere a energia rotacional para o gerador;
- **Nacelle:** é a carcaça que abriga:
  - **Caixa de engrenagens:** aumenta a velocidade do eixo entre o cubo do rotor e o gerador;
  - **Gerador:** usa a energia rotacional do eixo para gerar eletricidade usando eletromagnetismo;
  - **Unidade de controle eletrônico** (não mostrada): monitora o sistema, desliga a turbina em caso de mau funcionamento e controla o mecanismo de ajuste para alinhamento da turbina com o vento;
  - **Controlador** (não mostrado): move o rotor para alinhá-lo com a direção do vento;
  - **Freios:** detêm a rotação do eixo em caso de sobrecarga de energia ou falha no sistema.

- **Torre:** sustenta o rotor e a nacelle, além de erguer todo o conjunto a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo;
- **Equipamentos Elétricos:** transmitem a eletricidade do gerador através da torre e controlam os diversos elementos de segurança da turbina.

Com o avanço da tecnologia as turbinas modernas usam princípios aerodinâmicos mais sofisticados para capturar a energia do vento com mais eficácia. As duas forças aerodinâmicas principais que atuam sobre os rotores da turbina eólica são o empuxo, que atua perpendicularmente ao fluxo do vento, e o arrasto, que atua paralelamente ao fluxo do vento.

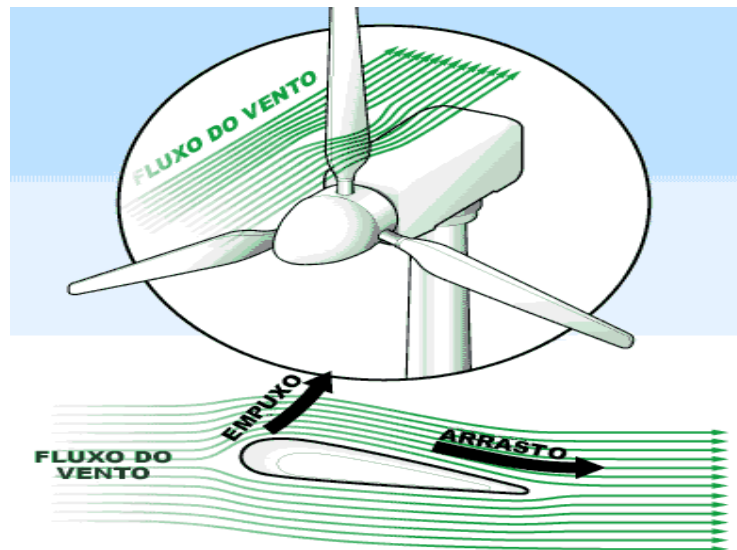


Figura 5 – Aerodinâmica da Turbina

As pás da turbina têm uma forma parecida com asas de avião: elas usam um desenho de aerofólio. Em um aerofólio, uma das superfícies da pá é um pouco arredondada, enquanto a outra é relativamente plana. O empuxo é um fenômeno bastante complexo e pode de fato exigir pós-graduação em matemática ou física para ser completamente entendido. Mas, simplificando, quando o vento se desloca sobre uma face arredondada e a favor da pá, ele precisa se mover mais rápido para atingir a outra extremidade da pá a tempo de encontrar o vento que se desloca ao longo da face plana e contra a pá (voltada na direção de onde sopra o vento). Como o ar que se move mais rápido tende a se elevar na atmosfera, a superfície curvada e contra o vento gera um bolsão de baixa pressão acima dela.

A área de baixa pressão puxa a pá na direção a favor do vento, um efeito conhecido como "empuxo". Na direção contra o vento da pá, o vento se move mais devagar e cria uma

área de pressão mais elevada que empurra a pá, tentando diminuir sua velocidade. Como no desenho de uma asa de avião, uma alta relação de empuxo/arrasto é essencial no projeto de uma pá de turbina eficiente. As pás da turbina são torcidas, de modo que elas possam sempre apresentar um ângulo que tire vantagem da relação ideal da força de empuxo/arrasto.

A aerodinâmica não é a única consideração de projeto em jogo na criação de uma turbina eólica eficaz. O tamanho importa: quanto maiores as pás da turbina (e, portanto, quanto maior o diâmetro do rotor), mais energia uma turbina pode capturar do vento e maior a capacidade de geração de energia elétrica. Falando de modo geral, dobrar o diâmetro do rotor quadruplica a produção de energia. Em alguns casos, entretanto, em uma área de menor velocidade do vento, um rotor de menor diâmetro pode acabar produzindo mais energia do que um rotor maior. Isso ocorre porque uma estrutura menor consome menos energia do vento para girar o gerador menor, de modo que a turbina pode operar a plena capacidade quase o tempo todo. A altura da torre também é um fator importante na capacidade de produção. Quanto mais alta a turbina, mais energia ela pode capturar, visto que a velocidade do vento aumenta com a altura (o atrito com o solo e os objetos ao nível do solo interrompe o fluxo do vento). Os cientistas estimam um aumento de 12% na velocidade do vento cada vez que se dobra a elevação.

Para calcular a real quantidade de potência que uma turbina pode gerar a partir do vento, você precisa conhecer a velocidade do vento no local da turbina e a capacidade nominal da turbina. A maioria das turbinas grandes produz sua potência máxima com velocidades do vento ao redor de 15 m/s (54 km/h). Considerando velocidades do vento estáveis, é o diâmetro do rotor que determina a quantidade de energia que uma turbina pode gerar. Tenha em mente que, à medida que o diâmetro de um rotor aumenta a altura da torre também aumenta, o que significa maior acesso a ventos mais rápidos.



<b>Diâmetro do rotor (metros)</b>	<b>Geração de potência (kW)</b>
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500

Tabela 01 – Tamanho do Rotor / Geração Máxima de Potência

A 54 km/h, a maioria das grandes turbinas gera sua capacidade nominal de potência, e a 72 km/h (20 m/s), a maioria das grandes turbinas se desliga. Existem diversos sistemas de segurança que podem desligar a turbina se a velocidade do vento ameaçar a estrutura, incluindo um simples sensor de vibração usado em algumas turbinas, que consiste basicamente de uma esfera metálica presa a uma corrente e equilibrada sobre um minúsculo pedestal. Se a turbina começar a vibrar acima de certo limite, a esfera cai do pedestal e puxa a corrente, ativando o mecanismo de desligamento.

Provavelmente, o sistema de segurança mais comumente ativado em uma turbina é o sistema de "frenagem", que é ativado por velocidades do vento acima do limite. Esse arranjo usa um sistema de controle de potência que, essencialmente, aciona os freios quando a velocidade do vento se eleva em demasia e depois "libera os freios" quando o vento diminui abaixo de 72 km/h. Os modernos projetos de grandes turbinas usam diversos tipos diferentes de sistemas de frenagem.

- **Controle de passo:** o controlador eletrônico da turbina monitora a geração de potência. Com velocidades do vento acima de 72 km/h, a geração de potência será excessiva, a ponto de o controlador ordenar que as pás alterem seu passo de modo que fiquem desalinhadas com o vento. Isto diminui a rotação das pás. Os sistemas de

controle de passo requerem que o ângulo de montagem das pás (no rotor) seja ajustável.

- **Controle passivo de perda de eficiência aerodinâmica:** as pás são montadas no rotor em um ângulo fixo, mas são projetadas de modo que a torção das próprias pás aplique a frenagem quando o vento for excessivo. As pás estão dispostas em ângulo, assim os ventos acima de certa velocidade causarão turbulência no lado contrário da pá, induzindo à perda da eficiência aerodinâmica. Em termos simples, a perda da eficiência aerodinâmica ocorre quando o ângulo da pá voltado para a chegada do vento se torna tão acentuado que começa a eliminar a força de empuxo, diminuindo a velocidade das pás.
- **Controle ativo de perda de eficiência aerodinâmica:** as pás neste tipo de sistema de controle de potência possuem passo variável, como as pás do sistema de controle de passo. Um sistema ativo de perda de eficiência aerodinâmica lê a geração de potência do mesmo modo que um sistema de passo controlado, mas em vez de mudar o passo das pás para desalinhá-las com o vento, ele as altera para gerar perda de eficiência aerodinâmica.

#### *2.4 Fatores Econômicos – Energia Eólica*

Em uma escala global, as turbinas eólicas geram atualmente tanta eletricidade quanto oito grandes usinas nucleares. Isso inclui não somente as turbinas de escala de geração pública, mas também as pequenas turbinas que geram eletricidade para casas ou negócios individuais (às vezes, usadas em conjunto com fontes de energia solar fotovoltaica). Uma pequena turbina com capacidade de 10 kW pode gerar até 16 mil kWh por ano, sendo que uma típica residência americana consome cerca de 10 mil kWh anuais. [1]



Figura 6 - Turbina Eólica Residencial (à esquerda) e Turbina Eólica em Escala de Geração Pública

Uma grande turbina eólica típica pode gerar até 1,8 MW de eletricidade ou 5,2 milhões de kWh anualmente, sob condições ideais, o suficiente para energizar quase 600 residências. Ainda assim, as usinas nucleares e de carvão podem produzir eletricidade mais barato do que as turbinas eólicas. As duas maiores razões para usar o vento para gerar eletricidade são as mais óbvias: a energia do vento é limpa e renovável. Ela não libera gases nocivos como CO<sub>2</sub> e óxidos de nitrogênio na atmosfera como faz o carvão e não corremos, tão cedo, o risco de uma escassez de ventos. Também existe a independência associada à energia eólica, já que qualquer país pode gerá-la em casa sem necessidade de recorrer a importações. E uma turbina eólica pode trazer eletricidade para áreas remotas não atendidas pela rede elétrica central.

Mas há inconvenientes, também. As turbinas eólicas nem sempre funcionam com 100% da potência, como muitas outras fontes energéticas, já que a velocidade do vento é variável. As turbinas eólicas podem ser barulhentas se você viver próximo a elas, além de serem perigosas para aves e morcegos. Em áreas desérticas de solo compactado existe o risco de erosão da terra se você cavar para instalar as turbinas. Além disso, como o vento é uma fonte de energia relativamente pouco confiável, os operadores de usinas eólicas precisam ter um sistema de reserva com uma pequena quantidade de energia confiável e não-renovável, para às vezes em que a velocidade do vento diminui. Algumas pessoas argumentam que o uso de energia poluente para sustentar a produção de energia limpa anula os benefícios, mas a indústria eólica clama que a quantidade de energia poluente necessária para manter um fornecimento estável de eletricidade em um sistema eólico é insignificante.

Quando se trata de turbinas eólicas, a localização é tudo. Saber quanto vento existe em uma área, qual sua velocidade e duração são fatores decisivos fundamentais para a construção de uma fazenda eólica eficiente. A energia cinética do vento aumenta exponencialmente em proporção à sua velocidade, de modo que um pequeno aumento na velocidade do vento representa na verdade um grande aumento do potencial de energia. A regra geral é que, dobrando a velocidade do vento, obtém-se um aumento de oito vezes no potencial de energia. Teoricamente, uma turbina em uma área com velocidade média do vento de 40 km/h irá gerar, na verdade, oito vezes mais eletricidade do que a mesma turbina onde a velocidade média do vento é de 20 km/h. Esse fator é "teórico" porque em condições reais há um limite para a quantidade de energia que uma turbina pode extrair do vento. Ele é

chamado de limite de Betz e é de cerca de 60%. Mas um pequeno aumento na velocidade do vento ainda leva a um aumento significativo da geração. [1]

Como na maioria das outras áreas de produção de energia, quando se trata de capturar a energia do vento, a eficiência apresenta números significativos. Grupos de grandes turbinas, chamadas fazendas eólicas ou usinas eólicas, representam o uso mais vantajoso em termos econômicos da capacidade de geração de energia eólica. As turbinas eólicas de escala de geração pública mais comum têm capacidades entre 700 kW e 1,8 MW, e são agrupadas para obter a máxima potência dos recursos eólicos disponíveis. Elas estão localizadas em áreas rurais com alta incidência de vento, e a pequena área da base das TEEHs significa que o uso da terra para a agricultura quase não é afetado. As fazendas eólicas têm capacidades que variam de uns poucos MW a centenas de MW. A maior usina eólica do mundo é a Fazenda Eólica de Raheenleagh, localizada no litoral da Irlanda. Em plena capacidade (atualmente opera com capacidade parcial), ela terá 200 turbinas, uma capacidade de geração nominal de 520 MW, totalizando um custo de cerca de US\$ 600 milhões para a construção.



Figura 7 - Fazenda Eólica de Raheenleagh

O custo da energia eólica em escala pública foi reduzido drasticamente nas últimas duas décadas devido aos avanços tecnológicos e de projeto na produção e instalação da turbina. No início dos anos 80, a energia eólica custava cerca de US\$ 0,30 por kWh. Já em 2007, a energia eólica custava de US\$ 0,03 a 0,05 por kWh nas áreas de vento abundante. Quanto maior a regularidade dos ventos em uma determinada área de turbinas, menor o

custo da eletricidade gerada pelas mesmas. Em média, o custo da energia eólica é de cerca de US\$ 0,04 a 0,10 nos Estados Unidos.

<b>Tipo de recurso</b>	<b>Custo médio (centavos de US\$ por kWh)</b>
Hidrelétrica	2-5
Nuclear	3-4
Carvão	4-5
Gás natural	4-5
Vento	4-10
Geotérmica	5-8
Biomassa	8-12
Célula combustível a hidrogênio	10-15
Solar	15-32

Tabela 02 – Comparação de Custos de Energia / EUA

#### 2.4.1 Custo da Energia Eólica

Considerando o grande potencial eólico existente no Brasil, confirmado através de medidas de vento precisas realizadas recentemente, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoelétricas, nucleares e hidroelétricas. Análises dos recursos eólicos medidos em vários locais do Brasil nos quais mostram a possibilidade de geração elétrica com custos da ordem de US\$ 70 - US\$ 80 por MWh. De acordo com estudos da ELETROBRÁS, o custo da energia elétrica gerada através de novas usinas hidroelétricas construídas na região amazônica será bem mais alto que os custos das usinas implantadas até hoje. Quase 70% dos projetos possíveis deverão ter custos de geração maiores do que a energia gerada por turbinas eólicas. Outra vantagem das centrais eólicas em relação às usinas hidroelétricas é que quase toda a área ocupada pela central eólica pode ser utilizada (para agricultura, pecuária, etc.) ou preservada como habitat natural.

A energia eólica poderá também resolver o grande dilema do uso da água do Rio São Francisco no Nordeste (água para gerar eletricidade versus água para irrigação). Grandes projetos de irrigação às margens do rio e/ou envolvendo a transposição das águas do rio para outras áreas podem causar um grande impacto no volume de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, conseqüentemente, prejudicar o fornecimento de energia para a

região. Logo, as centrais eólicas instaladas no Nordeste poderão produzir grandes quantidades de energia elétrica evitando que se tenha que utilizar a água do rio São Francisco.[2]

### *2.5 Impactos Socioambientais*

Entre os principais impactos socioambientais negativos das usinas eólicas se destacam os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devidos ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos. As turbinas de múltiplas pás são menos eficientes e mais barulhentas que os aerogeradores de hélices de alta velocidade.

Os impactos visuais são decorrentes do agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso de centrais eólicas com um número considerável de turbinas, também conhecidas como fazendas eólicas. Os impactos variam muito de acordo com o local das instalações, o arranjo das torres e as especificações das turbinas. Apesar de ser considerado como negativo, esses impactos tendem a atrair turistas, gerando renda, emprego, arrecadações e promovendo o desenvolvimento regional.

Outro aspecto que se deve ressaltar é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados. [2]

### *2.6 Perspectivas Futuras*

Na crise energética atual, as perspectivas da utilização da energia eólica são cada vez maiores no panorama energético geral, pois apresentam um custo reduzido em relação a outras opções de energia. Embora o mercado de usinas eólicas esteja em crescimento no Brasil, ele já movimentava 2 bilhões de dólares no mundo. Existem 30 mil turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. A energia eólica pode garantir 10% das necessidades mundiais de eletricidade até 2020, pode criar 1,7 milhões de novos empregos e reduzir a emissão global de dióxido de carbono na atmosfera em mais de 10 bilhões de toneladas.

Os campeões de uso dos ventos são a Alemanha, a Dinamarca e os Estados Unidos, seguidos pela Índia e a Espanha. No âmbito nacional, o estado do Ceará destaca-se por ter

sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico, que já é consumido por cerca de 160 mil pessoas. Outras medições foram feitas também no Paraná, Santa Catarina, Minas Gerais, litoral do Rio de Janeiro e de Pernambuco e na ilha de Marajó. A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com turbinas eólicas de médios e grandes portes conectadas à rede elétrica. [1]

Vários estados brasileiros seguiram os passos do Ceará, iniciando programas de levantamento de dados de vento. Hoje existem mais de cem anemógrafos computadorizados espalhados pelo território nacional. Considerando o grande potencial eólico do Brasil, confirmado através de estudos recentes, é possível produzir eletricidade a custos competitivos com centrais termoeletricas, nucleares e hidroelétricas, com custo reduzido.

### **CAPÍTULO 3. POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO / MUNDIAL**

#### *3.1 Panorama do Potencial Eólico Brasileiro*

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações (dados de superfície) e das diferentes metodologias empregadas.

De qualquer forma, os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento (locais, regionais e nacionais) têm dado suporte e motivado a exploração comercial da energia eólica no País. Os primeiros estudos foram feitos na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco. Com o apoio da ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT, o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE publicou em 1998 a primeira versão do *Atlas Eólico da Região Nordeste*. A continuidade desse trabalho resultou no *Panorama do Potencial Eólico no Brasil*. [2]

Os recursos apresentados na legenda da Figura 12 referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50m acima da superfície para cinco condições topográficas distintas: *zona costeira* – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; *campo aberto* – áreas planas de pastagens, plantações e /ou vegetação baixa sem muitas árvores altas; *mata* – áreas de vegetação nativa com arbustos e árvores altas, mas de baixa densidade, tipo de terreno que

causa mais obstruções ao fluxo de vento; *morro* – áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto.

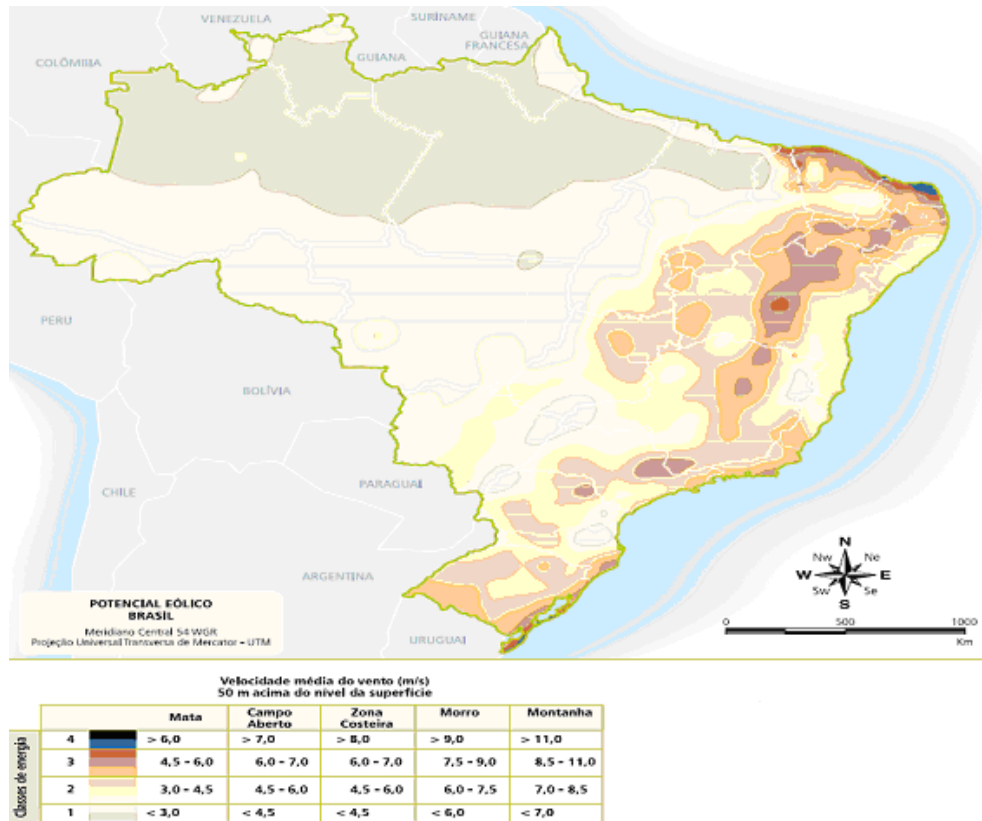


Figura 8 – Velocidade Média do Vento a 50 m de Altura.

Ainda na legenda, a classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste (zona costeira) pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão (mata) apresentará apenas valores entre 4,5 e 6 m/s. [2]

A Tabela 03 mostra a classificação das velocidades de vento e regiões topográficas utilizadas no mapa da Figura 12. Os valores correspondem à velocidade média anual do vento a 50 m de altura em m/s ( $V_m$ ) e à densidade média de energia média em  $W/m^2$  ( $E_m$ ). Os valores de  $E_m$  foram obtidos para as seguintes condições padrão: altitude igual ao nível do mar, temperatura de 20°C e fator de Weibull de 2,5. A mudança de altitude para 1.000 m acima do nível do mar acarreta uma diminuição de 9% na densidade média de energia e a



diminuição de temperatura para 15°C provoca um aumento de cerca de 2% na densidade de energia média. [2]

Classe	Mata		Campo aberto		Zona costeira		Morros	
	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )	$V_m$ (m/s)	$E_m$ (W/m <sup>2</sup> )
4	> 6	> 200	> 7	> 300	> 8	> 480	> 9	> 700
3	4,5 – 6	80 - 200	6 – 7	200 - 300	6,5 - 8	250 - 480	7,5 – 9	380 – 700
2	3 – 4,5	25 - 80	4,5 – 6	80 - 200	5 – 6,5	100 - 250	6 – 7,5	200 – 380
1	< 3	< 25	< 4,5	< 80	< 5	< 100	< 6	< 200

Tabela 03 – Definição das Classes de Energia

O potencial eólico brasileiro é de 143,5 GW (Gigawatts), segundo um estudo do Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel) do Ministério de Minas e Energia feito em 2005. O estudo levou em conta geradores de energia eólica de até 50 metros. Com o avanço tecnológico no setor, que permite geradores de até 80 metros atualmente no Brasil, o potencial cresceria mais ou menos 50%.

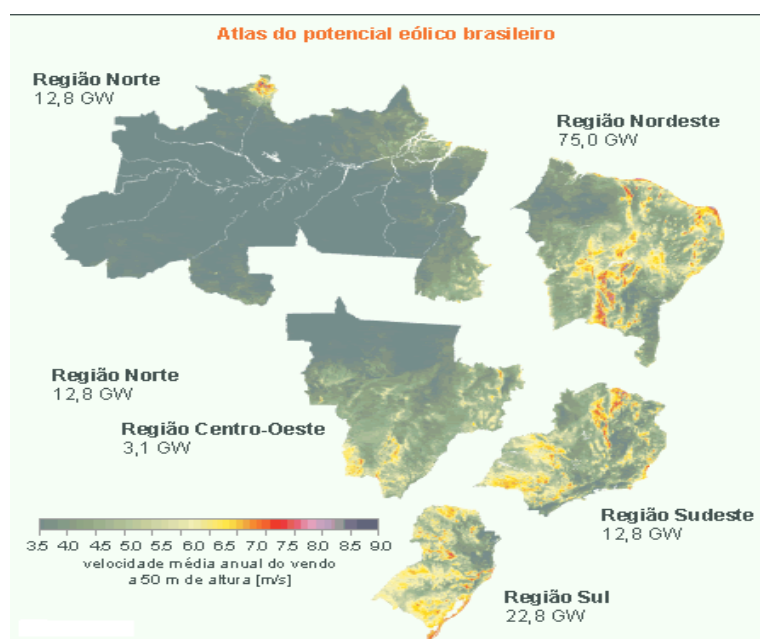


Figura 9 – Potencial Eólico estimado para vento médio anual igual ou superior a 7,0 m/s

Esse potencial de 143,5 GW representaria a geração de energia de 146 milhões de residências. A energia eólica não é energia firme, ou seja, com fornecimento constante. Assim, sua energia é armazenada em baterias ou trabalha em conjunto com as hidrelétricas, ajudando, por exemplo, no abastecimento dos reservatórios dessas usinas. O potencial instalado no Brasil é atualmente de 247,5 MW (Megawatts), ou seja, 0,25% dos 99,7 GW gerados no país, segundo dados de dezembro de 2007. A tabela abaixo mostra dados de seis meses antes.

<b>Usinas Eólicas em Operação</b>		
<b>Usina</b>	<b>Potência (kW)</b>	<b>Município</b>
Eólica de Prainha	10.000	Aquiraz - CE
Eólica de Taíba	5.000	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólica-Elétrica Experimental do Morro do Camelinho	1.000	Gouveia - MG
Eólio - Elétrica de Palmas	2.500	Palmas - PR
Eólica de Fernando de Noronha	225	Fernando de Noronha - PE
Mucuripe	2.400	Fortaleza - CE
RN 15 - Rio do Fogo	49.300	Rio do Fogo - RN
Eólica de Bom Jardim	600	Bom Jardim da Serra - SC
Eólica Olinda	225	Olinda - PE
Parque Eólico do Horizonte	4.800	Água Doce - SC
Macau	1.800	Macau - RN
Eólica Água Doce	9.000	Água Doce - SC
Parque Eólico de Osório	50.000	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	Osório - RS
Parque Eólico dos Índios	50.000	Osório - RS
<b>Total: 15 Usinas</b>	<b>Potência Total: 236.850 kW</b>	

Tabela 04 – Usinas Eólicas / Potência / Município

O crescimento da capacidade instalada no país se deve em grande parte pelos incentivos que o governo federal tem dado para o assunto. O Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), administrado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Dada a importância da caracterização dos recursos eólicos da Região Nordeste, o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, com o apoio da ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT lançou em 1998, a primeira versão do atlas eólico do Nordeste do Brasil com o objetivo principal de desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos confiáveis para a região.

Partindo desse projeto, em 1999 foi lançado o Atlas Eólico Nacional. O Atlas apresenta as condições médias anuais de vento para todo o território brasileiro na resolução de 1 km x 1 km. Por meio da integração dos mapas digitais, utilizando-se recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica a partir de

curvas de potência de turbinas eólicas existentes no mercado, chegou-se aos valores listados na tabela abaixo.

Esse processo indicativo foi realizado considerando-se as seguintes premissas:

- Foram integradas todas as áreas que apresentaram velocidades médias anuais iguais ou superiores a 6 m/s.
- Foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas no estado-da-arte mundial, instaladas em torres de 50m de altura.
- Para essa estimativa, foi utilizada uma densidade média de ocupação de terreno de apenas 2 MW/km<sup>2</sup>. Esse valor é considerado conservativo, uma vez que representa cerca de 20% do realizável por usinas eólicas em terrenos planos.
- Foram adotados intervalos com incrementos de 0,5 m/s para as velocidades médias anuais de vento. O desempenho de turbinas eólicas foi calculado para os limites inferiores de cada intervalo.
- Foi adotado um fator de disponibilidade de 0,98, considerado típico para usinas eólicas comerciais.
- Foram descartadas da integração as áreas cobertas por água (lagos e lagoas, açudes, rios e mar).

A partir desses resultados, estimou-se um potencial disponível (segundo as premissas anteriores) da ordem de 143,5 GW, conforme citado acima.

### *3.2 Potencial Eólico Mundial*

Em 1990, a capacidade instalada no mundo era inferior a 2.000 MW. Em 1994, ela subiu para 3.734 MW, divididos entre Europa (45,1%), América (48,4%), Ásia (6,4%) e outros países (1,1%). Quatro anos mais tarde, chegou a 10.000 MW e no final de 2002 a capacidade total instalada no mundo ultrapassou 32.000 MW. O mercado tem crescido substancialmente nos últimos anos, principalmente na Alemanha, EUA, Dinamarca e Espanha, onde a potência adicionada anualmente supera 3.000 MW.

Esse crescimento de mercado fez com que a Associação Européia de Energia Eólica estabelecesse novas metas, indicando que, até 2020, a energia eólica poderá suprir 10% de toda a energia elétrica requerida no mundo. De fato, em alguns países e regiões, a energia eólica já representa uma parcela considerável da eletricidade produzida. Na Dinamarca, por exemplo, a energia eólica representa 18% de toda a eletricidade gerada e a meta é aumentar essa parcela para 50% até 2030. Na região de Schleswig-Holstein, na Alemanha, cerca de

25% do parque de energia elétrica instalado é de origem eólica. Na região de Navarra, na Espanha, essa parcela é de 23%. Em termos de capacidade instalada, estima-se que, até 2020, a Europa já terá 100.000 MW. [2]

A Tabela 05 apresenta a evolução recente da capacidade instalada em vários países e regiões do mundo. Alemanha, EUA, Espanha e Dinamarca são responsáveis por quase 80% da capacidade instalada no mundo e o restante correspondente a 22% está instalado no resto do mundo.

Pais/região	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Alemanha	2080	2874	4445	6113	8734	12001
Estados Unidos	1590	1927	2492	2555	4245	4645
Dinamarca	1116	1450	1742	2297	2456	2889
Espanha	512	834	1530	2402	3550	4830
Brasil	3	7	20	20	20	22
Europa (exceto Alemanha, Dinamarca e Espanha)	1058	1411	1590	2610	2760	3637
Ásia	1116	1194	1287	1574	1920	2184
Continente americano (exceto EUA e Brasil)	52	128	194	223	302	353
Austrália e Pacífico	33	63	116	221	410	524
África e Oriente Médio	24	26	39	141	147	149
Total	7584	9914	13455	18156	24544	31234

Tabela 05 – Energia Eólica – Capacidade Instalada no Mundo (MW)

## CAPÍTULO 4. PROJETO ELÉTRICO DE CENTRAIS EÓLICAS

A energia eólica é uma forma de geração elétrica que se diferencia das fontes convencionais devido a dois importantes fatores: 1) Característica aleatória da fonte de energia, o vento e 2) Tecnologia utilizada nas turbinas eólicas atuais.

As principais diferenças existentes residem nos sentidos dos fluxos de potência elétrica em função do tipo de gerador utilizado, na inexistência de – ou reduzida – capacidade de regulação da potência elétrica entregue à rede elétrica e na eventual necessidade de mecanismos especiais de ligação e sincronismo com a rede elétrica.

Logo a seguir são apresentadas as principais etapas na elaboração e execução do projeto elétrico de uma central eólica. [4]

### 4.1 Caracterização do Local de Instalação

O local de instalação deve ser caracterizado através de diversos parâmetros. Essas características são fundamentais para o desenvolvimento do projeto da central eólica e a

integração desta na rede elétrica local. Os principais dados que devem ser obtidos para o local podem ser classificados em dois grandes grupos:

1. *Caracterização do recurso eólico;*
2. *Caracterização da rede elétrica de conexão.*

A caracterização do recurso eólico permite a elaboração do projeto elétrico otimizado onde os equipamentos serão projetados para operar nas condições locais.

A caracterização da rede elétrica, por sua vez, é fundamental para a definição dos parâmetros elétricos e na otimização da capacidade da central eólica. A rede elétrica local onde será conectada a central eólica (rede receptora) pode ser caracterizada basicamente através das seguintes grandezas:

- Potência de curto-circuito –  $S_{cc}$ ;
- Ângulo de impedância de curto-circuito –  $\psi_{cc}$ ;
- Nível e regulação da tensão no ponto de conexão –  $U_n \pm \Delta U$ ;
- Características do(s) transformador(es) da subestação de interligação;
- Parâmetros característicos das linhas/cabos de transmissão;
- Distância do ponto de conexão à central eólica;
- Regime de neutro.

Para o projeto elétrico básico da central eólica são necessárias as informações sobre o nível de tensão de conexão, a distância à central eólica e a potência de curto-circuito da subestação principal de interligação da central eólica ou do seu ramal. Para avaliar o impacto na operação da rede e na qualidade de energia elétrica local são necessários todos os parâmetros citados.

Normalmente relaciona-se a potência da central eólica instalada (ou a instalar) com a potência de curto-circuito no local, sendo esta chamada de relação de curto-circuito, e definida pela equação:

$$r_{cc} = S_{cc} / S_{central\ eólica} \quad (1)$$

Onde  $r_{cc}$  é a relação de curto-circuito,  $S_{central\ eólica}$  é a potência aparente nominal da central eólica e  $S_{cc}$  é a potência de curto-circuito do ponto de interligação. É comum associar valores elevados da potência de curto-circuito e, conseqüentemente de  $r_{cc}$ , à denominação de “redes elétricas *fortes*”.

#### 4.2 Caracterização das Turbinas Eólicas

Os parâmetros elétricos relevantes das turbinas eólicas para a elaboração de um projeto elétrico estão também relacionados com a tecnologia usada e devem ser apresentados pelo fabricante da máquina ou determinados através de testes de certificação independentes.

É importante salientar que a maioria das turbinas eólicas existentes no mercado possui máquinas assíncronas como geradores elétricos. O que significa que a potência ativa gerada a partir do vento é transmitida para a rede elétrica e, em contrapartida, uma parcela de energia reativa é demandada da rede para excitação do gerador elétrico.

Os principais parâmetros que caracterizam uma turbina eólica do ponto de vista elétrico são:

- Potência ativa nominal  $P_n$  (kW);
- Tensão nominal  $U_n$  (V);
- Demanda de energia reativa em função da potência ativa  $Q=f(P)$ ;
- Sistema de compensação de energia reativa e estratégia de compensação;
- Demanda de reativo na potência nominal  $Q_n$  (kVAr);
- Demanda de reativo em vazio  $Q_0$  (kVAr);
- Corrente nominal  $I_n$  (A);
- Potência máxima admissível  $P_{max}$  (kW);
- Potência máxima instantânea  $P_{inst}$  (kW).

Os quatro primeiros parâmetros (sublinhados) são importantes para o projeto elétrico de uma central eólica e servem para caracterizar a interligação da central eólica à rede elétrica. O conjunto completo de parâmetros indicados acima é relevante para a análise da qualidade da energia elétrica entregue no ponto de conexão.

A análise da potência máxima de projeto de uma central eólica e o consequente dimensionamento dos equipamentos de interligação, elevação de tensão e de proteção são realizados em função das potências máximas especificadas para cada tipo/modelo de turbina eólica. [4]

A caracterização do fluxo de potência reativa é essencial para a determinação da potência máxima na rede elétrica e, através da simulação da operação da central eólica, para a determinação dos níveis máximos e mínimos de tensão alcançados durante a operação da

central em regime permanente. Conseqüentemente, o dimensionamento do sistema de compensação de energia reativa torna-se fundamental para definir a potência elétrica nos condutores e transformadores e verificar o perfil de tensões da rede local. [4]

### 4.3 Dimensionamento Principal

#### 4.3.1 Potência e Corrente de Projeto

A potência elétrica aparente de projeto é definida como sendo a soma complexa da potência ativa máxima admissível e a respectiva demanda de potência reativa, quando não compensada localmente na sua integridade. Assim, a potência aparente de projeto  $S_{projeto}$  é encontrada através da equação abaixo:

$$S_{projeto} = f \cdot \sqrt{P_{max}^2 + Q_{max}^2} \quad (2)$$

onde  $f$  é um fator de segurança (somente aplicável nos casos onde os valores máximos admissíveis de potência para as turbinas eólicas não tenham sido fornecidos pelo fabricante).

Logo em seguida pode-se calcular a corrente elétrica de projeto através da equação:

$$I_{projeto} = \frac{S_{projeto}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (3)$$

Onde  $I_{projeto}$  é a corrente nominal de projeto,  $U_n$  é a tensão nominal nos terminais da turbina eólica e  $S_{projeto}$  é a potência elétrica aparente de projeto calculada com a equação (2).

A corrente nominal de projeto é usada para especificar a seção mínima dos cabos elétricos de conexão da turbina eólica à subestação bem como a corrente mínima do lado secundário do transformador. Este parâmetro é também conhecido como limite térmico do projeto.

A corrente elétrica de projeto de uma central eólica, no ponto de conexão, depende da tensão nominal na conexão, do número de turbinas eólicas e da corrente de projeto das turbinas eólicas no interior do parque. Assim sendo, a corrente de projeto pode ser especificada como apresentada na equação seguinte:

$$I_{projeto\ conexão} = \sum_{i=1}^{N_{t.e.}} \frac{I_{projeto,i}}{RT_i} \quad (4)$$

Onde  $I_{projeto\ conexão}$  é a corrente elétrica de projeto do ramal de ligação,  $I_{projeto,i}$  é a corrente de projeto da turbina eólica  $i$  calculada a partir da equação (3),  $RT_i$  é a relação de

transformação do transformador da turbina eólica  $i$  e  $N_{t.e.}$  é o número total de turbinas eólicas na central eólica. [4]

Caso seja usado um transformador elevador de tensão na subestação da central eólica, a corrente elétrica no lado secundário do mesmo é necessariamente proporcional à relação de transformação deste.

O dimensionamento elétrico realizado com as grandezas de projeto apresentadas nas equações (2) a (4) representam uma abordagem relativamente conservadora. Para alguns locais específicos pode ser mais vantajoso, do ponto de vista econômico, realizar a especificação do ramal de ligação e do transformador da subestação com uma potência inferior à potência nominal instalada no parque. Este procedimento, entretanto, requer a utilização de sistemas de supervisão e controle central para a central eólica. Este controlador central deverá monitorar a produção de energia eólica total e, se necessário, diminuir a geração da central eólica para respeitar os limites térmicos do ramal e/ou transformador instalados.

A decisão sobre os critérios de dimensionamento depende fundamentalmente da análise econômica dos diferentes cenários, isto é, análises que levem em consideração a característica do vento do local, o custo de não geração de energia em algumas horas do ano e o custo de instalação de um transformador central com a potência nominal da central eólica. [4]

#### *4.4 Sistemas de Proteção*

O projeto elétrico das turbinas eólicas deve incluir uma análise das proteções elétricas. Estas proteções incluem:

- Sobre e Sub-tensão;
- Curto-circuito;
- Sobre e Sub-freqüência.
- Pára-raios.

##### *4.4.1 Sobre e Sub-Tensão*

Todas as turbinas eólicas comerciais são fornecidas com um sistema de controle que supervisiona e controla os parâmetros operacionais da máquina, o que inclui as proteções e a gestão do sistema individual de compensação de energia reativa.



No sistema de controle é possível especificar condições de desligamento por sobre ou sub-tensão. A Tabela 06 apresenta os parâmetros de regulação convencionais relativos às proteções especificadas nos sistemas de controle das turbinas eólicas.

Parâmetro	Nível de acionamento (p.u)	Tempo de integração (segundos)
Sub-tensão	0,90	60
Sobre-tensão nível 1	1,10	60
Desligamento dos capacitores	1,06	---
Sobre-tensão nível 2	1,20	0,2

Tabela 06 - Valores convencionais de acionamentos das proteções para sobre e sub-tensões em sistemas de controle de turbinas eólicas.

O desligamento do banco de capacitores tem como objetivo evitar o desligamento da turbina por sobre-tensão nível 1, pois o desligamento dos capacitores força o aumento no fluxo de potência reativa proveniente do concessionário, provocando a queda de tensão na linha elétrica e reduzindo o nível de tensão nos terminais da turbina eólica.

#### 4.4.2 Curto-Circuito / Sobre-Corrente

Tanto a operação de partida como a operação contínua da turbina eólica pode, em algumas circunstâncias, ocasionar correntes acima da corrente nominal. A análise das correntes máximas que normalmente ocorrem na operação de turbinas eólicas é apresentada a seguir.

Como esperado, a ligação de uma turbina eólica à rede elétrica tem um impacto diferente que depende da sua tecnologia construtiva e operativa (podendo se apresentar de duas formas distintas: turbinas diretamente conectadas à rede e turbinas com conversores de frequência).

As Turbinas conectadas diretamente à rede possuem, em geral, um sistema de limitação de corrente denominado “*soft-starter*”, que limita a corrente em até três vezes a corrente nominal. Sem este sistema, os geradores assíncronos, durante a conexão, poderiam apresentar correntes similares as correntes de partida dos motores convencionais, que podem atingir valores de até 13 vezes a corrente nominal. [4]

Para turbinas eólicas com conversores de frequência, a corrente de ligação é controlada pelo sistema de controle e apresentam, em condições normais, valores consideravelmente baixos. Ainda assim, na ausência de informações detalhadas por parte dos fabricantes, é recomendável que se aplique para o projeto de instalação de turbinas

eólicas deste tipo um fator de segurança idêntico às turbinas com ligação através de “*soft-starter*”.

Logo, em ambos os casos, a máxima corrente durante a partida de uma turbina eólica pode ser calculada com a expressão:

$$I_{\text{maximo-partida}} = k_i \cdot I_{n,i} \quad (5)$$

Onde  $k_i$  é o fator de máxima corrente acima da corrente nominal  $I_n$  para a  $i$ -ésima turbina durante a partida (quando não fornecido pelo fabricante, pode ser estimado através do fator  $k_{u,i}(\psi_{cc})$ , fator de afundamento de tensão momentâneo durante a partida). Esta corrente deve ser calculada para todas as turbinas da central eólica, pois se considera muito difícil que duas turbinas eólicas executem a ligação à rede ao mesmo tempo. Logo, a soma das correntes máximas não é aplicada.

#### 4.4.3 Sobre-Frequência e Sub-Frequência.

Considerando que turbinas eólicas diretamente conectadas, têm a velocidade de rotação sincronizada pela frequência da rede elétrica – sendo assim máquinas passivas, sem qualquer capacidade de regulação de frequência – existe a necessidade de incluir proteções de salvaguarda da própria turbina com relação a ocorrências de altas e baixas frequências.

Normalmente o sistema de controle de turbinas eólicas comerciais possui parâmetros ajustáveis para desligamento, caso a frequência esteja fora dos valores normais de operação, o que representa uma tolerância de +1Hz e -3Hz. [4]

Em locais isolados, com a combinação de sistemas híbridos de energia e redes relativamente fracas com grande contribuição de energia eólica, a frequência da rede elétrica pode ser bastante afetada pela geração eólica.

#### 4.4.4 Pára – Raios

Os pára-raios são instalados nos terminais de média tensão dos transformadores para evitar que sobre tensões transitórias vindas da rede sejam transferidas para as turbinas eólicas. O sistema de controle também possui um sistema de pára-raios, para evitar maiores danos aos equipamentos eletrônicos instalados. Recentemente, face ao elevado número de descargas elétricas sofridas pelas pás das turbinas eólicas, alguns fabricantes incluem um sistema de pára-raios internos nas pás.

#### *4.5 Aterramento do Transformador Elevador*

É importante que um dos lados do transformador elevador seja conectado em delta, eliminando assim a circulação de corrente de seqüência zero, pois alguns fabricantes conectam os geradores em delta ou em estrela não aterrado, evitando a circulação de corrente de curto-circuito monofásica pelo gerador.

Apesar de não aterrar o neutro do gerador, um sistema de terra deve ser feito para o neutro do transformador, bem como para os pára-raios, para o sistema de controle e para a proteção de toque dos componentes metálicos da turbina eólica. O aterramento deve seguir as recomendações de norma. Normalmente, utilizam-se as ferragens da fundação da turbina eólica para melhorar o aterramento. [4]

## **CAPÍTULO 5. ESTUDO DO CASO DO PARQUE VALE DOS VENTOS**

### *5.1 Configuração do Empreendimento*

O Parque Eólico Vale dos Ventos situado no município de Mataraca no estado da Paraíba, possui uma capacidade instalada na ordem de 45 MW. O complexo é composto por dez sub-parques cada um com seis aerogeradores implantados, a capacidade instalada de cada um desses dez sub-parques é da ordem de 4,5 MW. Logo abaixo temos a relação dos dez sub-parques que compõem o complexo Vale dos Ventos.

- Mataraca;
- Camurin;
- Caravela;
- Atlântico;
- Coelho1, 2, 3 e 4;
- Albatroz.

Tomando como referência o sub-parque Coelhos 4, o empreendimento é composto por seis Aerogeradores como citados acima. Constituindo-se em uma central de produção de energia limpa, localizada em uma área, considerada de segurança, abrangendo espacialmente 21,2223 ha, mas ocupando apenas 2,3961 ha, onde serão construídos e distribuídos na faixa litorânea, situada no Município de Mataraca.

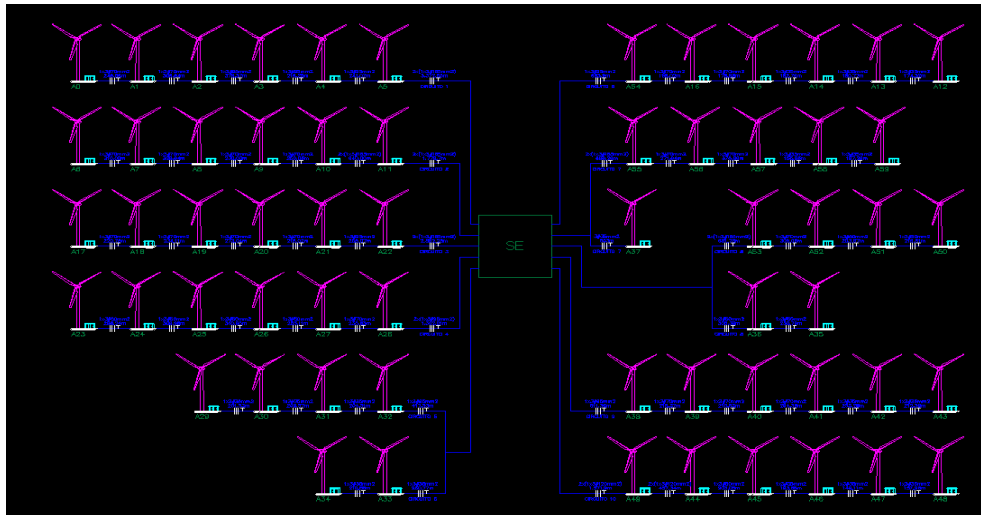


Figura 10 – Sistema de Interligação dos Dez Sub-Parques do Complexo Eólico VDV

### 5.2 Descrição do Sistema dos Aerogeradores

O Parque Eólico Vale dos Ventos é composto por 60 Aerogeradores do tipo ENERCON E-48, constituindo-se em uma central de produção de energia limpa, com capacidade de geração de 4,5 MW de Energia Limpa.

Os Aerogeradores tipo E-48 alcançam uma altura máxima de 99,6 m, constituindo-se por uma torre, com altura de 75,6 m até o eixo do rotor e pás com raio de 24 m. O E-48 é um aerogerador com rotor de três pás, controle de passo ativo, velocidade de operação variável e uma potência nominal de 750 kW. Com diâmetro do rotor de 48 m e altura do cubo de 50-76 m, o E-48 faz uso eficaz das condições de vento existentes no seu local de operação para a geração de energia elétrica. [3]

O anel interno do gerador e rotor do tipo E-48 é fabricado pela ENERCON, formando uma única peça. Estas duas peças são conectadas diretamente ao cubo, de forma que elas possam girar a uma mesma velocidade durante a operação. A ausência de caixa de engrenagens e outros componentes de alta rotação reduzem a perda de energia entre o rotor e o gerador, emissões de ruídos, vazamento de óleo e desgaste mecânico.

A energia produzida pelo gerador tipo E-48 alimentará a rede elétrica da ENERCON. Esse sistema é composto por um retificador/inversor. Ele assegura a alimentação da rede elétrica da concessionária com uma eletricidade de alta qualidade.

Cada uma das três pás é equipada com um sistema de passo elétrico. O sistema de passo limita a velocidade do rotor e o uso da potência do vento. Assim o sistema permite que a energia do E-48 seja à potência nominal, mesmo por um curto período.

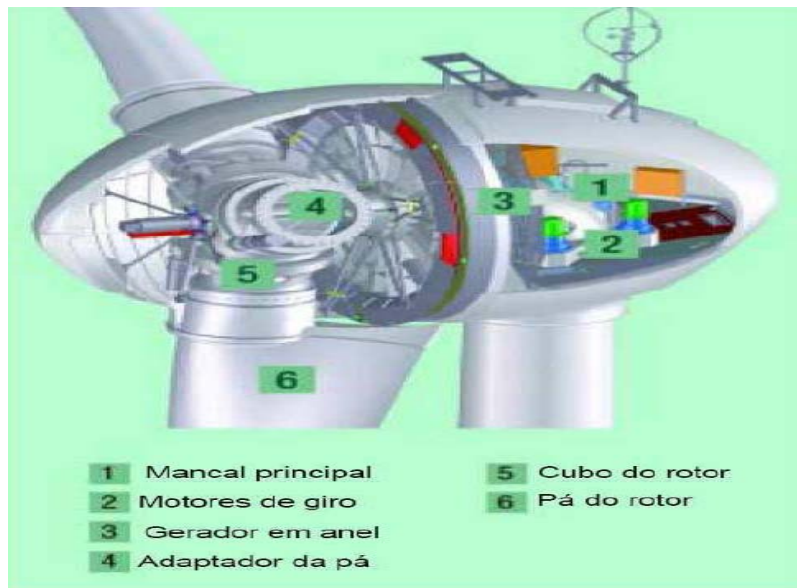


Figura 11 – Desenho do Sistema Interno da E-48

### 5.3 Descrição do Sistema de Gerenciamento de Rede

O gerador em anel é conectado à rede elétrica através do sistema de conexão de rede elétrica da ENERCON. Os principais componentes deste sistema são: Retificador, Conexão DC e Inversores Modulares.

O sistema de gerenciamento de rede, gerador e unidade de passo, é controlado de forma a fornecer uma potência máxima e uma excelente compatibilidade com a rede. O acoplamento flexível entre o gerador em anel e a rede oferece as condições ideais de transmissão de energia, além de reduzir as reações indesejáveis entre o rotor e a rede em ambas as direções. As mudanças repentinas na velocidade do vento são controladas de forma a manter a alimentação da rede estável. Assim, as eventuais falhas na rede elétrica têm pouco efeito sobre a parte mecânica. A potência que alimenta o E-48 pode ser regulada exatamente entre 0 kW a 750 kW ou 0,0 mW a 0,8 mW. [3]

### 5.4 Descrição do Sistema de Segurança

O sistema de segurança garante uma operação segura do Aerogerador, de acordo com as condições estabelecidas pelos padrões internacionais e institutos de teste independentes.

#### 5.4.1 Sistema de Freio

A operação dos aerogeradores da Wobben Windpower / ENERCON é feita aerodinamicamente através do posicionamento das pás do rotor. Os três transmissores de

passo independentes movem as pás do rotor para a posição de ataque em segundos. A velocidade do aerogerador é reduzida sem que haja a necessidade de aplicação de carga adicional. Em caso de emergência cada uma das pás do rotor será desacelerada com segurança através do seu próprio mecanismo de passo de frenagem. Os sistemas de frenagem são monitorados e incumbidos automaticamente de garantir disponibilidade.

#### *5.4.2 Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas*

O E-48 é equipado com um sistema de proteção contra descargas atmosféricas, que descarrega eventuais descargas elétricas sem causar qualquer dano ao Aerogerador. As pontas de condução e transmissão das pás do rotor e a ponta da pá possuem um perfil de alumínio preso a um anel de alumínio no ponto de gerenciamento da pá. As descargas elétricas são absorvidas com segurança por um perfil e a corrente de descarga é conduzida através de uma abertura de chispa e por cabos aterrados ao redor da fundação. [3]

A parte detrás do invólucro da nacela também é equipada com um condutor de descarga atmosférica que descarrega a corrente no solo. Se houver uma descarga atmosférica, todo o equipamento elétrico e eletrônico é protegido por componentes embutidos que absorvem a energia. Todos os componentes condutivos principais do aerogerador são conectados a uma barra coletora equipotencial com um cabo com seção transversal adequado.

Além disso, são instalados supressores de sobretensão com baixa impedância de aterramento no ponto de gerenciamento da linha de alimentação principal. As peças eletrônicas do aerogerador localizadas no invólucro de metal são eletricamente isoladas. O sistema de monitoramento remoto é protegido por um módulo de proteção especial para os dados de interface.

#### *5.4.3 Sistemas de Sensores*

Um amplo sistema de monitoramento garante a segurança do aerogerador. Todas as funções que necessitam de segurança (ex.: Velocidade do Rotor, Temperatura, Cargas, Oscilações, etc.), são monitoradas eletronicamente. Se esse sistema eletrônico falhar, uma função de segurança mecânica torna-se disponível. Se um dos sensores detectarem uma falha grave, o aerogerador será imediatamente desligado.

### *5.5 Sistema de Controle*

O Sistema de Controle do E-48 é composto por um sistema microprocessador desenvolvido pela ENERCON. Os sensores examinam todos os componentes e dados do aerogerador, como direção e velocidade do vento, e ajusta a operação do E-48 da forma mais apropriada. [3]

Quando a velocidade do vento adequada para operação do aerogerador for medida por três minutos consecutivos, é iniciado o processo automático de partida. Assim que o limite da velocidade mais baixa for alcançado, a energia alimenta a rede. Na partida, não ocorrem correntes elevadas, uma vez que o gerenciamento da rede é realizado através da conexão DC e conversor.

Durante a operação com carga parcial, a velocidade e o ângulo da pá do rotor são ajustados continuamente conforme as mudanças das condições do vento. A potência é controlada através da excitação do gerador. Se a velocidade nominal do vento exceder, o ângulo da pá é ajustado para manter a velocidade nominal.

Quando o sistema de controle de tempestade for desativado, o aerogerador irá parar assim que a média da velocidade do vento exceder 25m/s nos primeiros dez minutos ou houver um valor de pico de 30m/s. O aerogerador reiniciará quando a velocidade do vento permanecer, de forma constante, abaixo da velocidade de vento para desligamento. O rotor fica operando livremente a uma velocidade muito baixa mesmo quando desligado. [3]

### *5.6 Descrição da Rede Elétrica Subterrânea Interna*

Os aerogeradores da Central Geradora Eólica serão conectados mediante circuitos de 13,8 kv enterrados em valas com três condutores em alumínio (ou cobre), com seções a serem definidas de acordo com a tensão.

Os eletrodutos estarão alinhados e retilíneos. As distâncias entre eletrodutos, e eletrodutos e paredes da vala, será a mesma em toda a sua extensão. Os lances possuirão a declividade necessária para o escoamento das infiltrações. Também em razão das infiltrações, as emendas de eletrodutos receberão especial atenção na execução. Os eletrodutos serão vedados nas extremidades e suficientes em dimensão e quantidade para receberem, no mínimo, mais um circuito. Todos os eletrodutos serão lançados com cabo-guia. Após o lançamento e conexões, todos os elementos serão tampados a fim de se evitar a entrada de materiais, até o lançamento dos cabos. [3]

### *5.7 Características Gerais da Fundação*

As fundações das torres dos aerogeradores são do tipo sapata, de forma octagonal em concreto armado de base profunda, com profundidade de 3,5 m e diâmetro aproximado de 4,0 m.



Figura 12 – Exemplo do Tipo de Fundação para Aerogerador.

### *5.8 Considerações Finais – Parque Eólico VDV*

Com a conclusão da LT 69 kV MAT-RTT, o Parque Eólico Vale dos Ventos fornecerá energia em capacidade plena. O complexo já atende a cidade de Mataraca, com a conclusão da LT, mais uma cidade irá ser atendida, totalizando cerca de 25000 beneficiários, com o fornecimento de energia elétrica, proveniente do Parque Eólico VDV.

Vale ressaltar que o parque já está praticamente concluído. Todas as sessenta turbinas eólicas foram implantadas num total de 750 kW de capacidade instalada. A empresa Australiana Pacific Hydro responsável pela construção do parque pretende construir mais dois parques no estado do Rio Grande do Norte. Todos eles com o apoio do Ministério de Minas e Energia e o PROINFA.



## **CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES**

Este estudo teve como foco central apresentar todas as noções básicas referentes à Energia Eólica, no que tange ao processo de um Estudo de Caso do Parque Eólico Vale dos Ventos. Além de abordar todas as inovações tecnológicas utilizadas nos projetos de Centrais Eólicas.

Constatou-se a importância da análise atual do Potencial Eólico tanto no Brasil como no mundo. A partir desses estudos foi possível diagnosticar as falhas no setor elétrico brasileiro, no qual embora esteja direcionando investimentos para esta fonte alternativa de energia, não está fornecendo os investimentos necessários para suprir todo o potencial eólico existente no nosso país.

Pretende-se que esse estudo colabore com a produção científica, estimulando a construção de outros trabalhos nessa área temática, assim como; possibilite discussões e reflexões por parte dos profissionais visando à modernização no que tange ao processo de desenvolvimento de novas técnicas atreladas aos projetos de Aerogeradores, bem como aos projetos de novas e modernas Centrais Eólicas.

## CA PÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] [www.aneel.com.br](http://www.aneel.com.br) - Acesso entre os dias 12/11/08 à 28/01/09
- [2] [www.energiaeolica.com.br](http://www.energiaeolica.com.br) – Acesso entre os dias 15/11/08 à 02/02/09
- [3] Memorial Descritivo Parque Vale dos Ventos
- [4] Guia Elétrico CBEE