



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

RAMÓN JOSÉ DE FREITAS PINO

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DA USINA DE
MATARACA

Campina Grande, Paraíba
Março de 2011

RAMÓN JOSÉ DE FREITAS PINO

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DA USINA DE
MATARACA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Março de 2011

RAMÓN JOSÉ DE FREITAS PINO

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DA USINA DE MATARACA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Daniel, à minha mãe Gilvanete, à minha irmã Daniela e à minha família em geral onde tenho meu alicerce fundamentado. Todos acreditaram em meu potencial, apesar das fraquezas que surgiram no caminho, e me apoiaram de uma maneira ou de outra sem medir esforços.

Agradeço também aos meus verdadeiros amigos, que pelos mesmos motivos, sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço à minha noiva Mércia que esteve comigo nos bons e nos maus momentos, me apoiou quando precisei, me criticou quando mereci e teve paciência para com o engenheiro que aqui escreve essas linhas.

E agradeço principalmente a Deus, que me deu forças para concluir o curso. Agradeço não só por isso, mas também por tudo o que Ele me proporcionou até hoje, formando o homem de bem que sou.

“Sucesso antes de trabalho só no dicionário.”
Dito Popular.

RESUMO

O presente trabalho analisa a energia eólica e aponta na perspectiva de um melhor aproveitamento eólico como fonte renovável para geração de energia elétrica em substituição à utilização de combustíveis fósseis que muito contribuem ao agravamento do aquecimento global, o chamado efeito estufa. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica, incluindo um breve estudo dos ventos e os princípios básicos de funcionamento dos aerogeradores e seus componentes. São expostos dados da energia eólica do cenário nacional, bem como dados do panorama mundial. Depois, são mostradas algumas aplicações eólicas ambientalmente sustentáveis e por fim é apresentada a estrutura dos parques eólicos de Mataraca, no litoral norte da Paraíba.

Palavras-chave: Energia Eólica; Aerogeradores; Sustentabilidade; Parques Eólicos; Mataraca.

ABSTRACT

The present work analyzes the wind energy and proposes a better use of it as an alternative energy source to replace the use of fossil fuels that contribute directly to the global warming via the greenhouse effect. It begins with a general review, including a brief study of the winds and the basic principles of operation of the wind turbines and their components. So are exposed data of wind energy on the national scene as well as data from the global scene. Finally, applications that demonstrate the environmentally sustainable use of wind energy include the wind farms of Mataraca, in the northern coast of Paraíba.

Keywords: Wind Energy; Wind Turbines; Sustainability; Wind Farms; Mataraca.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Moinho de vento típico da Europa.....	02
Figura 2.1 - Formação dos ventos planetários.....	06
Figura 2.2 - Ilustração das forças de empuxo e de arrasto sobre as pás da turbina.....	08
Figura 2.3 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.....	09
Figura 2.4 – Comportamento de C_p em função de λ e β	11
Figura 2.5 – Trajetória de máxima potência.....	12
Figura 2.6 – Comportamento de C_p em função de λ	12
Figura 2.7 – Diagrama elétrico de uma máquina de indução trifásica com rotor bobinado.....	14
Figura 2.8 – Rotor de uma MIGE.....	14
Figura 2.9 – Diagrama elétrico de uma máquina síncrona.....	15
Figura 2.10 – Sistema de conversão eólica com correção de fator de potência utilizando estágio CC/CC intermediário.....	15
Figura 2.11 – Esquema de um sistema de velocidade fixa utilizando um gerador de indução gaiola de esquilo.....	17
Figura 2.12 – Esquema de um sistema de velocidade fixa utilizando um gerador síncrono.....	17
Figura 2.13 – Esquema de um sistema de velocidade limitada utilizando um gerador de indução com rotor bobinado.....	18
Figura 2.14 – Esquema de um sistema DFIG.....	19
Figura 2.15 – Esquema de um sistema sem caixa de engrenagens utilizando um gerador síncrono eletricamente excitado.....	20
Figura 2.16 – Esquema de um sistema sem caixa de engrenagens utilizando um gerador síncrono de ímã permanente.....	21
Figura 2.17 - Distribuição entre os tipos de sistemas eólicos da potência anual instalada.....	21
Figura 2.18 – Distribuição entre os tipos de sistemas eólicos da potência total instalada.....	22
Figura 2.19 – Modelo da turbina Darrieus.....	23

Figura 2.20 - Turbinas eólicas de eixo vertical.....	24
Figura 2.21 - Turbina Savonius.....	24
Figura 2.22 - Aerogerador experimental de eixo vertical.....	24
Figura 2.23 – Modelo de turbina de eixo horizontal.....	25
Figura 2.24 – Partes componentes de um aerogerador com eixo horizontal.....	26
Figura 2.25 – Variação da potência de saída com a velocidade do vento em turbina com controle de passo e controle por estol.....	29
Figura 2.26 – Parque eólico offshore Gunfleet Sands de 172 MW, localizado no estuário do rio Tamisa no Reino Unido.....	30
Figura 2.27 - Usina eólica de Horns Rev com capacidade de 160 MW, no litoral da Dinamarca.....	31
Figura 2.28 - Configuração de um sistema eólico isolado.....	32
Figura 2.29 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.....	32
Figura 3.1 – Evolução da potência eólica total instalada no mundo desde 2001.....	40
Figura 3.2 – Evolução da potência eólica adicionada a cada ano no mundo desde 2001.....	40
Figura 3.3 – Evolução das taxas de crescimento eólico no mercado mundial desde 1998.....	40
Figura 3.4 – Os dez países com as maiores taxas de crescimento eólico no mercado mundial em 2009.....	41
Figura 3.5 – Os dez maiores países em termos de capacidade eólica instalada até 2009.....	41
Figura 3.6 – Distribuição percentual da potência eólica adicionada em 2009....	42
Figura 3.7 – Distribuição percentual da potência eólica total instalada até 2009.....	42
Figura 3.8 – Os cinco países com os maiores sistemas offshore até 2009.....	43
Figura 3.9 – Geração de empregos pelas empresas do setor eólico desde 2005..	44
Figura 3.10 – Taxas de crescimento do setor eólico na Europa, Ásia e América do Norte.....	44
Figura 3.11 – Distribuição percentual de crescimento eólico por continente em 2009.....	44
Figura 3.12 – Distribuição percentual da potência eólica total instalada por continente até 2009.....	45

Figura 3.13 – Tendência percentual de crescimento eólico por continente desde 2004.....	45
Figura 3.14 – Regime de precipitação/temperatura na região Sudeste.....	49
Figura 3.15 – Regime de precipitação/temperatura na região Norte.....	50
Figura 3.16 – Regime de precipitação/temperatura na região Nordeste.....	50
Figura 3.17 – Regime de precipitação/temperatura na região Centro-Oeste.....	50
Figura 3.18 – Regime de precipitação/temperatura na região Sul.....	51
Figura 3.19 – Sazonalidade das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste.....	51
Figura 3.20 – Distribuição dos empreendimentos energéticos em operação no Brasil.....	52
Figura 3.21 – Distribuição dos empreendimentos energéticos em construção no Brasil.....	53
Figura 3.22 – Distribuição dos empreendimentos energéticos outorgados no Brasil.....	54
Figura 3.23 – Distribuição percentual da capacidade de geração de energia elétrica por estado.....	55
Figura 3.24 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2009 e 2010.....	56
Figura 3.25 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2008 e 2009.....	56
Figura 3.26 – Potência eólica instalada no mundo, entre 1996 e 2008.....	59
Figura 3.27 – Tendência do crescimento eólico projetada até 2020.....	59
Figura 3.28 – Aumento do tamanho dos rotores de 1985 até 2005.....	61
Figura 4.1 – Foto frontal do BWTC.....	66
Figura 4.2 – Vista vertical dos 3 aerogeradores do BWTC.....	66
Figura 4.3 – Imagem do aerogerador acoplado à estrutura horizontal.....	67
Figura 4.4 – Imagem ilustrativa de projeto sustentável em energia.....	67
Figura 4.5 - Parque piezoelétrico na cidade planejada de Masdar, próximo a Abu Dhabi.....	68
Figura 4.6 - Hastes flexíveis de fibra de carbono e base de cerâmica feita com material piezoelétrico.....	69
Figura 4.7 - Utilização do poste autônomo em avenida.....	71
Figura 4.8 - Partes componentes do poste híbrido.....	71
Figura 4.9 - Micro gerador eólico (Windbelt).....	72

Figura 4.10 - Fenômeno “flutter” no ímã do windbelt.....	72
Figura 5.1 - Parque Millennium.....	73
Figura 5.2 - Parque Vale dos Ventos.....	74
Figura 5.3 - Placa de identificação do parque Vale dos Ventos.....	75
Figura 5.4 - Parque Vitória.....	75
Figura 5.5 - Placa de identificação do parque Vitória.....	75
Figura 5.6 – Modelo E-48 da Wobben Enercon.....	77
Figura 5.7 - Modelo do aerogerador V77 da Impsa Wind.....	78
Figura 5.8 - Casa de controle e comando do parque Vitória.....	79
Figura 5.9 - Antena de transmissão de dados via satélite do parque Vitória.....	80
Figura 5.10 - Torre para coleta de dados dos ventos do parque Vitória.....	80
Figura 5.11 - Torre para coleta de dados eólicos do parque Vale dos Ventos.....	81
Figura 5.12 - Subestação do parque Vale dos Ventos.....	81

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Potencial Eólico (geração por região) do Brasil.....	46
Mapa 2 - Potencial Eólico no Nordeste.....	48
Mapa 3 - Potencial Eólico Trimestral no Brasil.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distúrbios causados por turbinas eólicas à rede elétrica.....	34
Tabela 2 - Potencial Mundial.....	37
Tabela 3 – Potência eólica instalada pelo mundo até junho de 2010.....	38
Tabela 4 – Países com as maiores redes offshore do mundo até 2009.....	43
Tabela 5 – Distribuição da potência eólica instalada pelo mundo entre 2006 e 2009.....	45
Tabela 6 – Empreendimentos energéticos em operação no Brasil.....	52
Tabela 7 – Empreendimentos energéticos em construção no Brasil.....	53
Tabela 8 – Empreendimentos energéticos outorgados no Brasil.....	53
Tabela 9 – Legenda da nomenclatura utilizada nas Tabelas 6, 7, 8 e nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22.....	54
Tabela 10 – Capacidade Instalada (kW) por estado.....	54
Tabela 11 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2009 e 2010.....	56
Tabela 12 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2008 e 2009.....	56
Tabela 13 – Distribuição dos parques eólicos instalados no Brasil.....	57
Tabela 14 – Legenda da nomenclatura utilizada para designar o destino da energia.....	58
Tabela 15 – Diâmetro do rotor em função da potência gerada.....	61
Tabela 16 – Usinas e centrais geradoras eólicas da Paraíba.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS, UNIDADES E TERMOS EM INGLÊS

TEEV - turbina eólica de eixo vertical
TEEH - turbina eólica de eixo horizontal
CO₂ - dióxido de carbono
A – Ampère
V – Volt
kV – quilovolt (10^3 V)
MVA – Megavoltampère (10^6 VA)
W – Watt
kW – quilowatt (10^3 W)
MW – Megawatt (10^6 W)
GW – Gigawatt (10^9 W)
TW – Terawatt (10^{12} W)
RPM – Rotações por minuto
m² – metro quadrado
W/m² – Watt por metro quadrado
m – metro
m/s – metro por segundo
MWh - Megawatt (10^6 W) por hora
TWh - Terawatt (10^{12} W) por hora
TWh/ano – Terawatt (10^{12} W) por hora por ano
GWh – Gigawatt (10^9 W) por hora
mm – milímetro
°C – Grau Celsius
m³/s – metro cúbico por segundo
US\$ - Dólar Americano
US\$ /MWh – Dólar Americano / megawatt por hora
R\$ - Real Brasileiro
R\$ /MWh – Real Brasileiro / megawatt por hora

UHE – Unidade Hidroelétrica

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

CLP – Controlador Lógico Programável

IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor (Tradução: Transistor Bipolar de Porta Isolada)

ONSHORE – Tradução: Em terra firme, na costa

OFFSHORE – Tradução: Fora da terra firme, da costa (no mar, por exemplo)

WWEA – World Wind Energy Association (Tradução: Associação Mundial de Energia Eólica)

CC - Corrente contínua

CA - Corrente alternada

V_V - Velocidade do vento

ρ - Massa específica do ar (aproximadamente 1,2 Kg/m³)

Cp - Coeficiente de potência

β - Ângulo de passo (*Pitch angle*)

λ – Velocidade específica (*Tip speed ratio*)

MCC - Máquina de corrente contínua

MA - Máquina assíncrona

MS - Máquina síncrona

MIRB - Máquinas de indução de rotor bobinado

DFIG - Gerador de indução duplamente alimentado

BDFIG - Gerador de indução duplamente alimentado sem escovas

MIGE - Máquina de indução gaiola de esquilo

MSIP - Máquina síncrona de ímã permanente

GIGE - Gerador de indução gaiola de esquilo

GS - Gerador síncrono

DFIG - Doubly fed induction generator (Tradução: Gerador de indução duplamente alimentado)

GSIP - Gerador síncrono de ímã permanente

GSEE - Gerador síncrono com excitação elétrica

WWF – World Wildlife Fund (Tradução: Fundo Mundial para a Vida Selvagem e Natureza)

BWTC - Bahrain World Trade Center

LED – Light Emitting Diode (Tradução: Diodo Emissor de Luz)

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

MME - Ministério de Minas e Energia

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN - Sistema Interligado Nacional

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

BNB - Banco do Nordeste do Brasil

CHESF - Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

ATECEL - Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior

ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

PIE – Produção Independente de Energia

NE - Nordeste

UF – Unidade Federativa

GE - General Electric

CRESESB – Centro de Referência para Energias Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

ISO – International Organization for Standardization (Tradução: Organização Internacional para Padronização)

SUMÁRIO

Lista de Figuras	ix
Lista de Mapas	xiii
Lista de Tabelas	xiv
Lista de Abreviaturas e Siglas	xv
Capítulo 1 - Introdução	1
1.1. Pós-Eletricidade.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Geral.....	3
1.2.2 Objetivo Específico.....	4
1.3. Estrutura do Trabalho.....	4
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	5
2.1. Formação dos Ventos.....	5
2.2. Aproveitamento da Energia Cinética dos Ventos.....	7
2.2.1 Aerodinâmica.....	7
2.3. Composição de um Sistema de Conversão Eólio/Elétrica.....	9
2.3.1 Turbina Eólica.....	9
2.3.2 Gerador Elétrico.....	13
2.3.2.1 Máquinas Assíncronas.....	13
2.3.2.2 Máquinas Síncronas.....	14
2.3.3 Conversores Estáticos.....	15
2.4. Configurações de Sistemas de Conversão Eólio/Elétrica.....	16
2.4.1 Sistemas de Conversão Eólica Operando com Velocidade Fixa (Tipo A).....	16
2.4.2 Sistemas de Conversão Eólio/Elétrica Operando com Velocidade Limitada (Tipo B).....	18
2.4.3 Sistemas de Conversão Eólio/Elétrica Operando com Velocidade Variável e com Conversor Eletrônico Processando Parcialmente a Energia (Tipo C).....	18

2.4.4	Sistemas de Conversão Eólico/Elétrica Operando com Velocidade Variável e com Conversor Eletrônico Processando Totalmente a Energia (Tipo D).....	19
2.5.	Aceitação no Mercado dos Principais Tipos de Sistemas de Geração Eólico/Elétrica.....	21
2.6.	Modelos de Turbinas Eólicas.....	23
2.6.1	Turbina Eólica de Eixo Vertical.....	23
2.6.2	Turbina Eólica de Eixo Horizontal.....	25
2.6.2.1	Principais Componentes de uma TEEH.....	25
A.	Pás do Rotor.....	26
B.	Nacele.....	27
C.	Eixo.....	27
D.	Freios.....	27
E.	Caixa Multiplicadora.....	27
F.	Torre.....	28
G.	Sistemas de Controle Aerodinâmico da Potência.....	28
2.7.	Aplicação.....	30
2.7.1	Sistemas OFFSHORE.....	30
2.7.2	Utilizações dos Sistemas Eólicos.....	31
2.7.2.1	Sistemas Isolados.....	31
2.7.2.2	Sistemas Híbridos.....	32
2.7.2.3	Sistemas Integrados à Rede Elétrica.....	33
2.7.3	Armazenamento da Energia Eólica.....	33
2.7.4	Qualidade da Energia.....	33
2.7.5	Meio Ambiente.....	35
2.7.5.1	Selo para Identificação de Produtos Feitos com Uso de Energia Eólica.....	36
Capítulo 3 - Dados Gerais da Energia Eólica.....		37
3.1.	Energia Eólica no Mundo.....	37
3.2.	Energia Eólica no Brasil.....	46
3.2.1.	Potencial Eólico do Nordeste.....	47
3.2.2.	Capacidade de Geração do Brasil.....	52

3.2.2.1. Contribuição da Capacidade Instalada por Estado.....	54
3.2.2.2. Geração de Energia Eólica no Nordeste.....	55
3.2.3. Usinas Eólicas Instaladas no Brasil.....	57
3.3. Tendências para o Futuro.....	59
3.3.1. Tamanho dos Rotores.....	60
3.3.2. A Evolução Comercial de Aero geradores de Grande Porte.....	61
3.4. Custo.....	63
Capítulo 4 - O Estado da Arte.....	65
4.1. Edifícios Auto-Suficientes em Energia.....	65
4.2. Modelo com Hastes Flexíveis.....	68
4.3. Poste de Iluminação Pública Alimentado por Energia Eólica e Solar.....	70
4.4. Gerador de Energia Eólica Portátil.....	72
Capítulo 5 - Estudo de Caso.....	73
5.1. Caso Mataraca.....	73
5.1.1. Usinas e Centrais Geradoras da Paraíba.....	76
5.1.2. Modelo Utilizado nos Parques Millennium e Vale dos Ventos.....	76
5.1.3. Modelo Utilizado no Parque Vitória.....	78
5.1.4. Comparativo entre os Modelos.....	79
5.1.5. Análise Diária dos Ventos.....	80
5.1.6. Integração à Linha de Transmissão.....	81
5.2. Perspectivas dos Parques Eólicos da Região Nordeste.....	82
5.3. Atlas Eólico da Paraíba.....	83
Capítulo 6 - Conclusões.....	84
Bibliografia.....	86
Anexo A - Figura A - Ranking mundial na geração de energia eólica até 2009.....	88
Anexo B - Figura B - Ranking mundial na geração de energia eólica em sistemas OFFSHORE até 2009.....	90

Anexo C - Figura C - Diagrama unifilar com parte do regional 69/13,8 kV derivado da subestação Mussuré II (destaque para as centrais geradoras eólicas Vale dos Ventos e Millennium).....91

1 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A história da energia eólica tem o seu início formado pela necessidade que o homem tinha de aprimorar técnicas agrícolas que o auxiliasse nas diversas etapas do trabalho, assim conseguindo aproveitar mais o que a natureza tinha para lhe oferecer. Tarefas como a moagem dos grãos, o bombeamento de água e serviços em serraria exigiam cada vez mais esforço braçal e animal. Isso levou ao desenvolvimento de uma forma primitiva de moinho de vento, utilizada no beneficiamento dos produtos agrícolas, que constava de um eixo vertical acionado por uma longa haste presa a ela, movida por homens ou animais caminhando numa gaiola circular. Existia também outra tecnologia utilizada para o beneficiamento da agricultura onde uma gaiola cilíndrica era conectada a um eixo horizontal e a força motriz (homens ou animais) caminhava no seu interior.

Esse sistema foi aperfeiçoado com a utilização de cursos d'água como força motriz surgindo, assim, as rodas d'água. Historicamente, o uso das rodas d'água precede a utilização dos moinhos de ventos devido a sua concepção mais simplista de utilização de cursos naturais de rios como força motriz. Como não se dispunha de rios em todos os lugares para o aproveitamento em rodas d'água, a percepção do vento como fonte natural de energia possibilitou o surgimento de moinhos de ventos substituindo a força motriz humana ou animal nas atividades agrícolas. Mesmo com baixa eficiência devido a suas características, os cata-ventos primitivos apresentavam vantagens importantes para o desenvolvimento dessas atividades. Um modelo desse sistema é ilustrado na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Moinho de vento típico da Europa.
Fonte: blog10.wordpress.com

1.1 Pós-Eletricidade

Com a descoberta da eletricidade e o transcorrer dos anos, os protótipos atualmente conhecidos são consequência da evolução histórica de rotores que utilizam a captação dos ventos para a geração de eletricidade. Tiveram contribuições muito importantes para esse processo evolutivo dos aerogeradores países como Estados Unidos, Rússia, Inglaterra, Dinamarca, França e Alemanha.

No entanto, o custo elevado da implantação de geradores eólicos e a abundância e grande utilização dos combustíveis fósseis fez com que o uso da energia eólica não tivesse o desenvolvimento em pesquisas, fato que foi alterado a partir da crise do petróleo na década de 1970. Esse fato possibilitou o desenvolvimento na utilização da energia eólica para produção de eletricidade. As pesquisas foram iniciadas e intensificadas justamente pelos mesmos países que contribuíram com a evolução das primeiras turbinas eólicas: Dinamarca, Alemanha, Estados Unidos, Rússia e Inglaterra.

O crescimento na utilização da energia eólica é provocado pelos investimentos em pesquisas nessa área e principalmente pela busca de novas fontes de energia, visto que é uma fonte renovável que permite a diminuição de emissões de dióxido de carbono (CO_2) pela não utilização de fontes poluidoras. O crescimento de mercado fez com que a Associação Européia

de Energia Eólica indicasse que, até 2020, cerca de 10% da energia elétrica no mundo poderá vir da energia eólica.

No Brasil, devido ao grande potencial hidráulico existente, a utilização da energia eólica para produção de eletricidade só passou a ganhar espaço nos últimos anos. O potencial eólico brasileiro, pela qualidade e distribuição dos ventos, vem estimulando iniciativas para os desenvolvimentos tecnológico, industrial e de projetos de parques eólicos nas diferentes regiões do país. O governo federal criou em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), onde foi prevista para a primeira fase a instalação de 3.300 MW em projetos de energia renovável até o final 2006, depois prorrogado para o final de 2007, prorrogado mais uma vez para o final de 2008 e novamente prorrogado para o final de 2009. Em maio de 2009, com a medida provisória 450, foi determinado que a conclusão da primeira fase do programa deveria se realizar até dezembro de 2010 (fato não ocorrido). A segunda etapa do programa prevê o atendimento da demanda de 10% do consumo anual de energia elétrica do Brasil por fontes eólicas, biomassa e PCHs em prazo de até 20 anos. Mesmo não tendo sido concluída a primeira etapa, este programa proporcionou maiores investimentos para a área de geração eólica no país.

1.2 Objetivos

A seguir, são descritos os objetivos da proposta desse trabalho tanto em caráter geral quanto específico.

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma revisão sobre os conceitos que envolvem a conversão de energia de fonte eólica em energia elétrica. Tipos de vento, partes componentes dos aerogeradores, modelos de turbinas, mapas e potenciais eólicos, instalações eólicas, dados nacionais e internacionais, aspectos econômicos e custo, relação com o meio ambiente, tendências para o futuro e modelos eólicos de sustentabilidade são alguns dos temas apresentados.

1.2.2 Objetivo Específico

Fazer um estudo de caso dos parques eólicos de Mataraca, região localizada no litoral da Paraíba, levando-se em consideração assuntos como: potência instalada, custo das implementações estruturais, modelos dos aerogeradores e empresas proprietárias dos parques.

1.3 Estrutura do Trabalho

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica sobre a energia eólica abrangendo assuntos como a formação dos ventos, composição de um sistema de conversão de energia eólica em elétrica, as tecnologias de conversão existentes e as tecnologias utilizadas no mercado eólico, modelos de turbinas, elementos componentes, tipos de aplicações eólicas, armazenamento, qualidade da energia e envolvimento com o meio ambiente.

O Capítulo 3 aborda principalmente aspectos estatísticos, mostrando dados da atual condição eólica mundial, o cenário nacional, as futuras tendências e o custo do processo eólico.

O Capítulo 4 apresenta modelos de aplicabilidade eólica como os edifícios auto-suficientes em energia, as hastes piezoelétricas, postes de iluminação produtores independentes de energia e o gerador eólico portátil.

O Capítulo 5 descreve o estudo de caso na região de Mataraca, as usinas geradoras da Paraíba, os modelos de turbina utilizadas nos parques Paraibanos e um comparativo entre esses modelos, as empresas fabricantes dessas turbinas bem como outras grandes fabricantes eólicas mundiais, as perspectivas eólicas para o Nordeste e a elaboração do atlas eólico da Paraíba.

No Capítulo 6 são feitas as considerações finais do trabalho incentivando um maior aproveitamento do potencial não explorado, bem como a questão da complementaridade hídrico-eólica e por fim, têm-se a bibliografia e fontes utilizadas para pesquisa.

2 CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Essa parte do trabalho trata de uma revisão simplificada sobre alguns dos assuntos que envolvem a energia eólica, desde a formação dos ventos e seu aproveitamento cinético até a geração de eletricidade ao consumidor e os “impactos” desse tipo de energia sobre o meio ambiente.

2.1 Formação dos Ventos

A energia eólica é resultado da radiação solar sobre a terra, uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos de rotação e translação da terra. Quando o sol aquece uma determinada área de terra, o ar ao redor dessa massa de terra absorve parte desse calor. Em certa temperatura, esse ar mais quente começa a se elevar muito rapidamente, pois um determinado volume de ar quente é mais leve do que um mesmo volume de ar mais frio. As partículas de ar que se movem mais rápido (mais quentes) exercem uma pressão maior do que as partículas que se movem mais devagar, de modo que são necessárias menos partículas quentes para manter a pressão do ar normal em uma determinada elevação. Quando este ar quente mais leve se eleva subitamente, o ar mais frio flui rapidamente para preencher o espaço vazio deixado. Este ar que velozmente preenche o espaço vazio é conhecido como vento.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam de “soprar”, pois os mecanismos que os produzem (aquecimento no equador e resfriamento nos pólos) estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes, e podem ser classificados em:

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

A Figura 2.1 apresenta a ilustração desses ventos constantes:

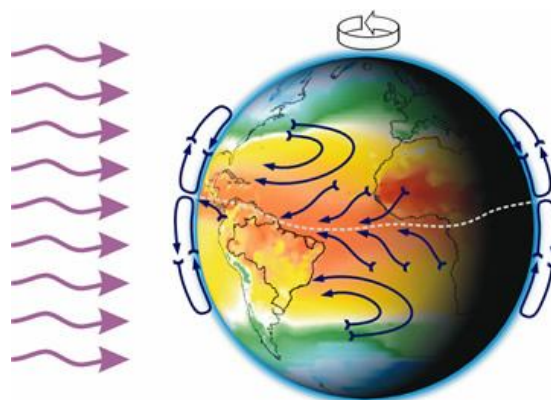


Figura 2.1 - Formação dos ventos planetários.
Fonte: O Eco.

Para as regiões próximas à linha do equador, como é o caso do Nordeste brasileiro, merece destaque a importância dos ventos alísios. Estes ventos são constituídos por movimentos de massas de ar em direção às menores pressões da aquecida faixa equatorial, sendo defletidos no sentido oposto à rotação da Terra pela ação da força de Coriolis.

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

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

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

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

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

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

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

2.2 Aproveitamento da Energia Cinética dos Ventos

O princípio de funcionamento de um aerogerador consiste basicamente em duas fases de conversão: O rotor, acionado pelas pás do aerogerador, retira energia cinética do vento e a converte em conjugado mecânico e o gerador converte o conjugado mecânico em eletricidade. Os aerogeradores são formados basicamente pela turbina eólica, gerador elétrico e sistemas de controle. No conceito de turbina eólica entram elementos como as pás do rotor, cubo, eixo, freios, caixa multiplicadora, torre, entre outros componentes que serão abordados mais adiante. No entanto, primeiramente é necessário destacar e fazer uma breve introdução sobre as forças aerodinâmicas envolvidas no processo de captação dos ventos pelas pás do rotor, que são basicamente o empuxo e o arrasto.

2.2.1 Aerodinâmica

Diferentemente do antigo projeto de moinho de vento holandês, que dependia muito da força do vento para colocar as pás em movimento, as turbinas modernas usam princípios aerodinâmicos mais sofisticados para capturar a energia do vento com maior 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. Essas duas forças podem ser observadas na Figura 2.2.

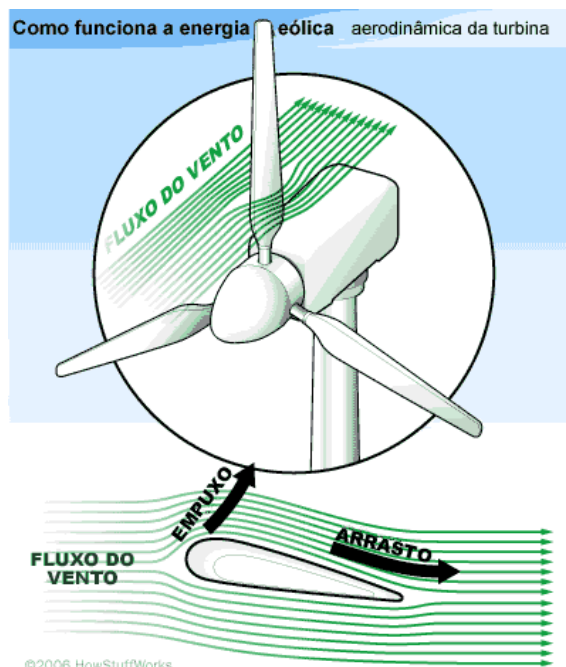


Figura 2.2 - Ilustração das forças de empuxo e de arrasto sobre as pás da turbina.
Fonte: hsw.uol.com.br

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. 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 curva 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.

2.3 Composição de um Sistema de Conversão Eólico/Elétrica

Em se tratando de sistemas de médio e grande porte, a maioria dos sistemas de conversão eólico-elétrica é composta basicamente por uma turbina, um gerador elétrico, e um processador eletrônico de potência. Dependendo do sistema, o mesmo pode apresentar também caixas de engrenagens para adequar a rotação da turbina eólica à rotação nominal do gerador.

2.3.1 Turbina Eólica

A função principal da turbina eólica é converter a energia cinética dos ventos em energia mecânica rotacional. Quando acoplada a um gerador elétrico, essa energia é transformada em eletricidade através de uma conversão eletromecânica. A energia cinética do vento por unidade de volume para uma dada velocidade do vento V_v pode ser calculada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_v^2 \quad (1)$$

Na Equação 1, ρ é a massa específica do ar (aproximadamente $1,2 \text{ Kg/m}^3$). A potência eólica disponível é, portanto:

$$P_E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V_v^3 \quad (2)$$

Na Equação 2, “A” é a área da circunferência que é varrida pelas pás da turbina conforme ilustra a Figura 2.3.

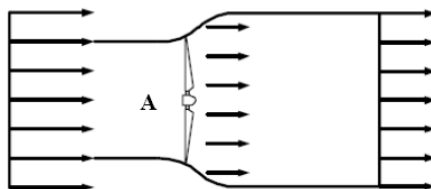


Figura 2.3 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.

Apenas parte desta energia é realmente convertida em energia mecânica rotativa. O rendimento da turbina é fortemente influenciado pela sua curva de coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$. Esta curva é função dos valores do ângulo de passo das pás β (*Pitch angle*) e da razão entre a velocidade de ponta de pá e a velocidade do vento (*Tip speed ratio*), como descrito na Equação 3:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

Na Equação 3, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6 dependem da característica aerodinâmica da turbina. As variáveis λ e β se relacionam de acordo com a Equação 4. Essa expressão pode ter seus coeficientes alterados dependendo da turbina eólica. Para uma turbina com três pás e de eixo horizontal tem-se:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Logo, a potência extraída do vento por uma turbina é dada por:

$$P_m = P_E C_p(\lambda, \beta) \equiv \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) V_V^3 \quad (5)$$

Pode ser mostrado que no máximo 59,3% da energia cinética do vento que atravessa a área varrida pelas pás da turbina eólica pode ser aproveitada como energia mecânica. Esta razão de 0,593 é conhecida como limite de Betz. Este limite pode ser justificado pelo fato de que o vento continua com certa velocidade após atravessar um aerogerador, ou seja, parte de sua energia cinética é conservada (Figura 2.3). Entretanto, na prática o limite de Betz nunca é atingido por uma turbina eólica. O valor de C_p geralmente fica em torno de 0,48 devido às perdas por turbulência e arrasto (*drag and tip losses*). Mesmo que estas perdas sejam desconsideradas, o limite de Betz nunca é alcançado, pois sempre haverá imperfeições no design das pás.

Para uma turbina moderna, os valores de c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 e c_6 são definidos empiricamente: $c_1 = 0,5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0,4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$ e $c_6 = 0,0068$. A Figura 2.4 mostra o comportamento de C_p em função de λ para alguns valores de β de acordo com os parâmetros de c definidos acima e com modelo definido pelas Equações 3 e 4. Neste caso específico, o máximo valor de C_p ($C_{p\text{máx}} = 0,48$) é encontrado para $\lambda = 8,1$. Este valor de λ é definido como λ nominal (λ_{nom}).

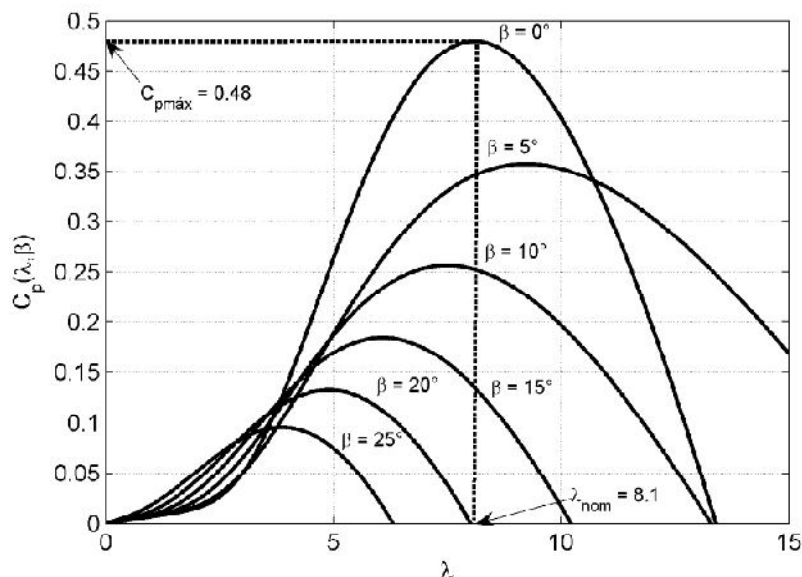


Figura 2.4 – Comportamento de C_p em função de λ e β .

Um sistema de conversão eólico pode ser classificado como de velocidade fixa, variável ou limitada. Como pode ser visto na Figura 2.5, a curva de potência extraída por uma turbina eólica tem seu formato deslocado para cima e para direita, em função da velocidade da turbina, obedecendo à Equação 5. Dessa forma, sistemas que operam com a velocidade constante só conseguem extrair a máxima potência da turbina em uma pequena faixa de velocidades do vento, geralmente é escolhida a velocidade mais frequente da região. Nos sistemas eólicos com velocidade variável, o ganho de energia pode variar de 3 a 28% quando comparados com sistemas de velocidade fixa, dependendo das condições do vento e dos parâmetros da turbina. Com o uso de conversores operando com algoritmos de MPPT (*maximum power point tracking*) que calculam a velocidade ótima do gerador dada uma velocidade do vento, é possível se extrair a máxima potência da turbina em uma faixa maior de velocidades do vento.

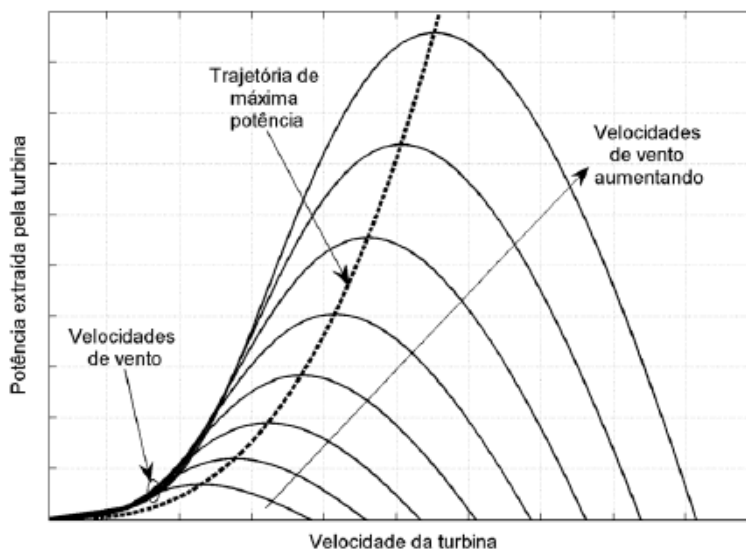


Figura 2.5 – Trajetória de máxima potência.

Turbinas de eixo horizontal com duas e três pás são as que permitem maior aproveitamento da energia dos ventos com velocidades entre 7 e 15 m/s, comumente encontradas em regiões litorâneas. A Figura 2.6 mostra a influência do número de pás no coeficiente de potência.

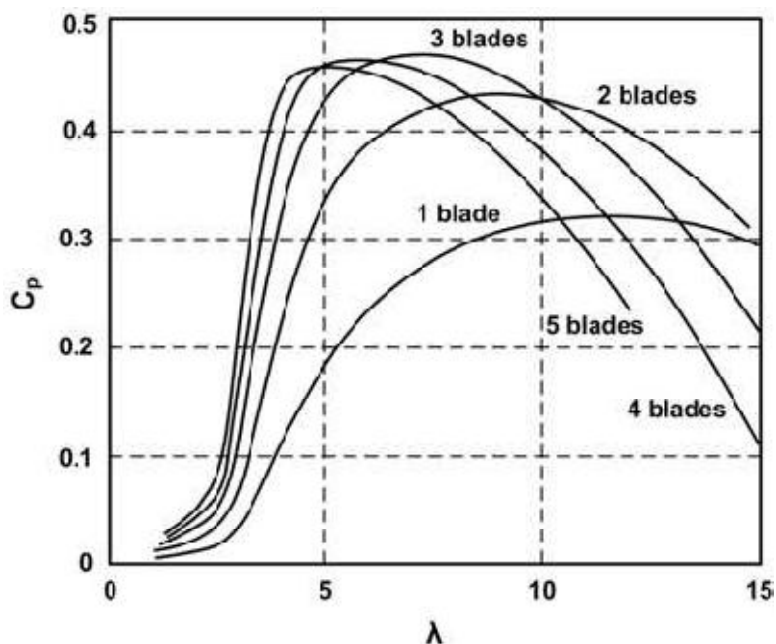


Figura 2.6 – Comportamento de C_p em função de λ .

Turbinas de eixo horizontal com três pás são mais utilizadas do que turbinas com duas pás, pois elas são menos susceptíveis ao efeito de sombreamento da torre.

2.3.2 Gerador Elétrico

As máquinas elétricas são comumente divididas em máquinas de corrente contínua (MCC), assíncronas (MA) e síncronas (MS). Dentre as quais as máquinas de corrente contínua não são mais de interesse prático para a operação como gerador devido a uma série de desvantagens:

- Gastos elevados com manutenção por conta do desgaste das escovas;
- São maiores e mais pesadas do que as máquinas de corrente alternada para uma mesma potência;
- Não são adequadas para possuir enrolamentos com alta tensão.

Atualmente são utilizados em aerogeradores máquinas trifásicas síncronas e assíncronas.

2.3.2.1 Máquinas Assíncronas

São máquinas de corrente alternada normalmente de enrolamento trifásico que podem possuir um rotor em gaiola de esquilo ou bobinado. Atualmente as máquinas assíncronas são mais utilizadas em aplicações industriais. Podem possuir 2, 4, 6 e algumas vezes até 8 pares de pólos, entretanto há uma preferência por máquinas com 2 pares devido ao custo de produção. Máquinas assíncronas de rotor bobinado, ou máquinas de indução de rotor bobinado (MIRB) possuem anéis deslizantes e escovas permitindo que as bobinas do rotor possam ser alimentadas. Essas máquinas, quando aplicadas em sistemas eólicos de geração, são conhecidas como geradores de indução duplamente alimentados (DFIG). Recentemente, para tentar reduzir o custo principalmente de manutenção destas máquinas estudos são feitos para aperfeiçoar a utilização dos geradores de indução duplamente alimentados sem escovas (BDFIG).

O modelo elétrico de uma máquina de indução de rotor bobinado é mostrado na Figura 2.7. Os enrolamentos do estator U, V, W são conectados à rede fazendo com que circule correntes nas bobinas e conseqüentemente surja um campo magnético girante no entreferro da máquina conhecida como campo girante. Esse campo gira com uma velocidade denominada de velocidade síncrona e induz correntes no rotor com frequências iguais as do estator multiplicada pelo escorregamento (relação entre a velocidade do rotor e a velocidade síncrona).

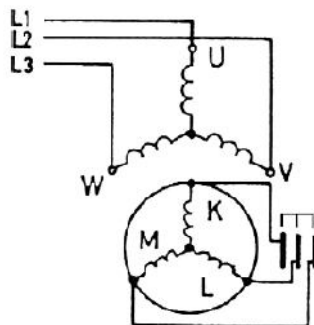


Figura 2.7 – Diagrama elétrico de uma máquina de indução trifásica com rotor bobinado.

Já a máquina de indução gaiola de esquilo (MIGE) não possui bobinas no rotor e sim barras curto-circuitadas, conforme a Figura 2.8, que geram uma corrente quando concatenadas pelo campo magnético girante. Essas correntes produzem o campo magnético do rotor que gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona.

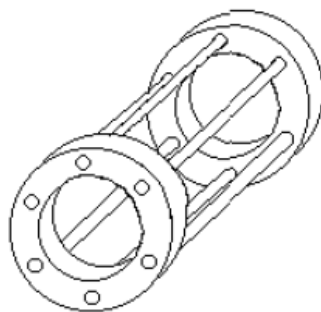


Figura 2.8 – Rotor de uma MIGE.

Essa máquina funciona como motor caso a velocidade do rotor seja menor que a do campo girante e como gerador caso a velocidade seja maior.

2.3.2.2 Máquinas Síncronas

Diferentemente da máquina de indução, onde as correntes no rotor eram geradas por indução eletromagnética, na máquina síncrona as correntes no rotor são geradas ou por excitação externa de suas bobinas ou, no caso das máquinas síncronas de ímã permanente (MSIP), não há correntes no rotor sendo o fluxo do rotor gerado por ímãs permanente. A excitação DC externa é normalmente transmitida para o rotor através de anéis deslizantes e escovas. A Figura 2.9 mostra o modelo elétrico de uma máquina síncrona. Neste tipo de máquina, o rotor gira sempre na

velocidade síncrona e com uma pequena abertura angular entre o campo gerado pelo estator e o campo gerado pelo rotor. A rotação se dá através do princípio de alinhamentos do campo do estator e do rotor.

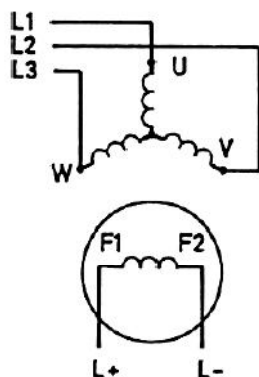


Figura 2.9 – Diagrama elétrico de uma máquina síncrona.

2.3.3 Conversores Estáticos

Uma série de conversores pode ser utilizada para se processar a energia entregue pelo gerador. Na grande maioria dos casos são utilizados dois conversores para processar a energia.

No primeiro é utilizado um retificador trifásico para fornecer um nível contínuo (CC) podendo esse barramento ser fixo ou não. Nesse estágio o próprio retificador pode realizar correção de fator de potência ou um conversor CC/CC é adicionado para realizar a correção conforme a Figura 2.10:

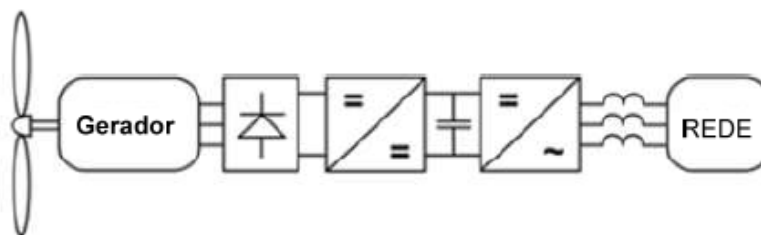


Figura 2.10 – Sistema de conversão eólica com correção de fator de potência utilizando estágio CC/CC intermediário.

O segundo estágio pode ser composto por um conversor CC/CC, seja carregando baterias ou suprindo cargas CC isoladas, ou por um inversor monofásico ou trifásico conectado ou não a rede elétrica.

A utilização de conversores de potência em sistemas eólicos é vantajosa, pois:

- Permite que as turbinas operem com velocidade variável;
- Permite que seja feita uma maximização da energia que é extraída do gerador;
- Permite controle das potências ativa e reativa que são injetadas na rede;
- Provê proteção eletrônica para a turbina evitando danos em condições extremas do vento.

2.4 Configurações de Sistemas de Conversão Eólico/Elétrica

No que diz respeito à velocidade de rotação da turbina os sistemas de conversão eólico-elétrica podem ser classificados como de velocidade fixa, velocidade limitada e velocidade variável. Sistemas com velocidade variável podem ainda ser divididos em sistemas com conversor eletrônico processando totalmente a potência e processando parcialmente a potência. Outra classificação que também pode ser feita leva em consideração se o sistema possui ou não caixas de engrenagem. A seguir, será mostrada uma série de configurações de sistemas para conectar aerogeradores à rede elétrica.

2.4.1 Sistemas de Conversão Eólica Operando com Velocidade Fixa (Tipo A)

Sistemas eólicos de velocidade fixa geralmente utilizam caixas de engrenagem com vários estágios e um gerador de indução gaiola de esquilo (GIGE) conectado a rede elétrica através de um transformador de baixa frequência, como mostrado na Figura 2.11. Essa configuração foi muito utilizada em turbinas fabricadas na Dinamarca na década de 90, dando inclusive nome ao sistema (Danish). Como o GIGE sempre absorve reativos da rede faz-se necessário o uso de um banco de capacitores para realizar compensação e, para uma conexão mais suave com a rede, um *soft-starter* pode ser utilizado. Visando extrair mais potência em uma faixa maior de velocidades do vento, GIGEs com número de pólos variáveis passaram a ser utilizados possibilitando a operação em duas velocidades diferentes.

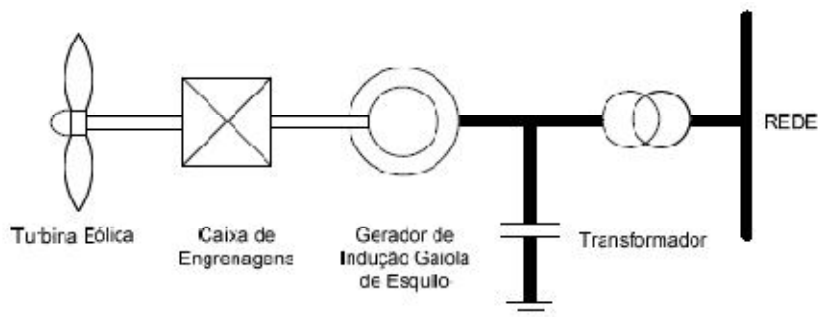


Figura 2.11 – Esquema de um sistema de velocidade fixa utilizando um gerador de indução gaiola de esquilo.

Também podem ser encontrados em antigos sistemas de geração eólica e de pequeno porte, geradores síncronos (GS) sendo conectados diretamente à rede elétrica, como mostra a Figura 2.12.

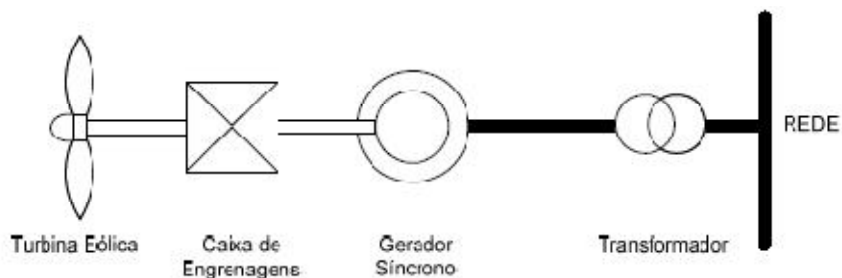


Figura 2.12 – Esquema de um sistema de velocidade fixa utilizando um gerador síncrono.

Sistemas como esse são simples e podem controlar a potência reativa pela corrente de excitação do rotor, porém são a pior opção do ponto de vista dinâmico. Apenas ângulos de carga muito pequenos são possíveis para se compensar as cargas dinâmicas impostas sobre o gerador pela turbina eólica. Grandes picos de carga, devido a fortes rajadas de vento, por exemplo, podem causar uma perda de sincronismo. O gerador síncrono, em resposta até mesmo aos menores picos de carga, como flutuação de frequência da rede, tende a produzir oscilações que são fracamente amortecidas. Tais dificuldades de sincronismo e mecânicas fazem com que essa topologia não seja mais empregada em novos sistemas eólicos.

2.4.2 Sistemas de Conversão Eólico/Elétrica Operando com Velocidade Limitada (Tipo B)

Na última década do século 20, o fabricante Vestas introduziu esse conceito de sistema de geração. Nele é utilizado uma máquina de indução de rotor bobinado cujos enrolamentos do rotor são conectados em um conversor para que possa ser variada a resistência nos mesmos, conforme a Figura 2.13.

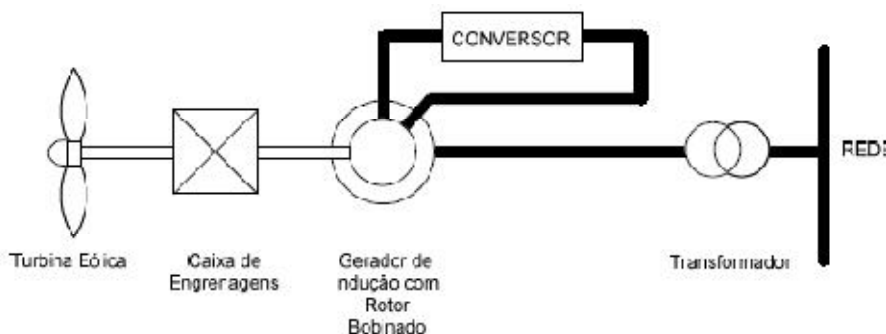


Figura 2.13 – Esquema de um sistema de velocidade limitada utilizando um gerador de indução com rotor bobinado.

A operação com velocidade variável é obtida controlando a energia que é retirada do rotor, sendo essa energia dissipada no resistor externo. Logo, a variação de velocidade desse sistema depende da capacidade do resistor de suportar altas temperaturas. O limite de variação da velocidade gira em torno de 10% abaixo da velocidade síncrona.

2.4.3 Sistemas de Conversão Eólico/Elétrica Operando com Velocidade Variável e com Conversor Eletrônico Processando Parcialmente a Energia (Tipo C)

Essa configuração é conhecida na literatura como um sistema *doubly fed induction generator* (DFIG), ou em português gerador de indução duplamente alimentado. Nesse tipo de sistema, a turbina eólica opera com velocidade variável associada a um gerador de indução de rotor bobinado e um conversor em configuração *back-to-back*. Como pode ser visto na Figura 2.14, o estator é diretamente conectado a rede elétrica, enquanto que o rotor é conectado à rede através do conversor estático. O conversor do lado da máquina controla a frequência das tensões no rotor e dessa forma também sua velocidade. Tipicamente, esta configuração permite uma

variação de mais ou menos 30% da velocidade síncrona. A potência que é processada pelo conversor varia de 25 a 30% da capacidade do gerador o que torna esse tipo de sistema atrativo e popular do ponto de vista econômico tanto que diversos fabricantes como Vestas, Gamesa, Repower e Nordex, entre outros, utilizam esse conceito.

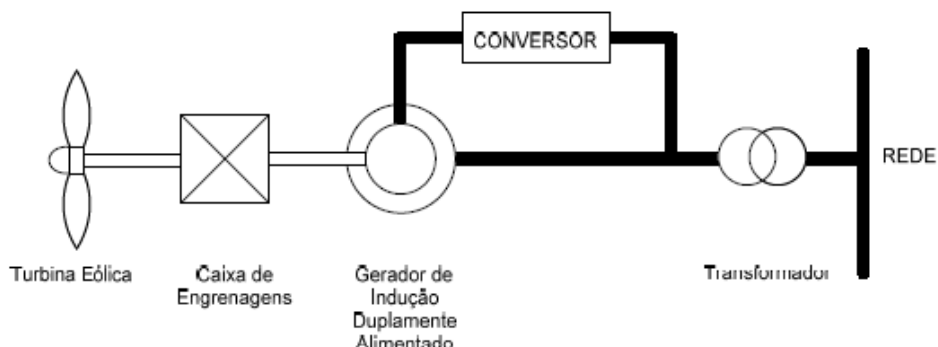


Figura 2.14 – Esquema de um sistema DFIG.

Existem outras vantagens desse sistema em relação ao que utiliza o gerador de indução diretamente acoplado à rede elétrica como, por exemplo, a possibilidade de compensação de reativos e uma conexão suave com a rede elétrica. Como desvantagens desse sistema podem-se destacar: maior necessidade de manutenção (uma vez que o sistema precisa de um conjunto de engrenagens de vários estágios), escovas com anéis coletores e a necessidade de utilização de um controle mais complexo.

2.4.4 Sistemas de Conversão Eólio/Elétrica Operando com Velocidade Variável e com Conversor Eletrônico Processando Totalmente a Energia (Tipo D)

Diferentemente dos sistemas com velocidade variável em que o conversor processa apenas parcialmente a potência do gerador, em sistemas de conversão eólica operando com velocidade variável e com conversor eletrônico processando totalmente a energia, não há a necessidade de caixas de engrenagens, uma vez que os geradores possuem um elevado número de pólos. Esse fato confere ao sistema como um todo maior confiabilidade e eficiência. O fato de o conversor processar toda a potência do gerador permite que seja possível o sistema se conectar suavemente à rede em toda a faixa de velocidade com a desvantagem de maiores perdas nos dispositivos eletrônicos.

Basicamente existem dois tipos de geradores que são utilizados em sistemas diretamente conectados a rede elétrica com velocidade variável e processamento total da energia pelo conversor: o gerador síncrono com excitação elétrica (GSEE) e o gerador síncrono de ímã permanente (GSIP).

O GSEE conectado à rede é mostrado na Figura 2.15. A amplitude e a frequência das tensões podem ser completamente controladas pelo conversor eletrônico do lado do gerador e, portanto a velocidade de rotação da turbina até mesmo para velocidades muito baixas. Outra vantagem dessa configuração com o gerador síncrono é a possibilidade de controle do fluxo através da corrente de excitação o que permite diminuir as perdas em diferentes níveis de potência. O fabricante que mais utiliza essa concepção é a Enercon que possui máquinas de até 4 MW.

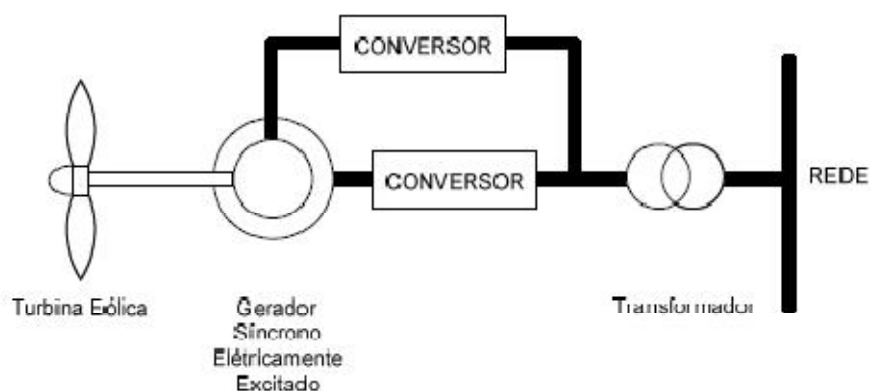


Figura 2.15 – Esquema de um sistema sem caixa de engrenagens utilizando um gerador síncrono eletricamente excitado.

A Figura 2.16 mostra outro esquema de geração eólica onde toda a potência do gerador é processada pelo conversor, entretanto, neste caso é utilizado um GSIP. A utilização do gerador síncrono de ímã permanente possui uma série de vantagens em relação ao mesmo gerador com excitação elétrica, como por exemplo:

- Por utilizar material magnético no rotor, não há a necessidade de uma fonte de alimentação adicional;
- Possui maior eficiência e densidade de geração;
- Melhores características térmicas devido à ausência de perdas no campo;
- Maior confiabilidade, pois não possui anéis deslizantes.

Como desvantagens, podem-se destacar: maior custo devido ao ímã permanente, maiores dificuldades no processo de fabricação e a desmagnetização dos ímãs em temperaturas mais elevadas.

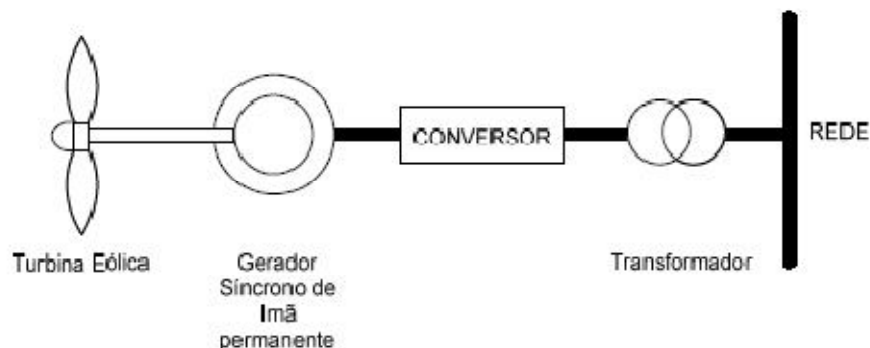


Figura 2.16 – Esquema de um sistema sem caixa de engrenagens utilizando um gerador síncrono de ímã permanente.

2.5 Aceitação no Mercado dos Principais Tipos de Sistemas de Geração Eólico/Elétrica

Ao longo dos últimos anos, tem existido uma tendência para se utilizar turbinas com velocidade variável (tipo C e tipo D). A Figura 2.17 mostra a porcentagem de potência instalada por ano dos quatro tipos diferentes de sistemas eólicos no período de 1995 a 2005. Os dados fornecem uma boa visão da tendência mundial para a instalação de novos sistemas eólicos.

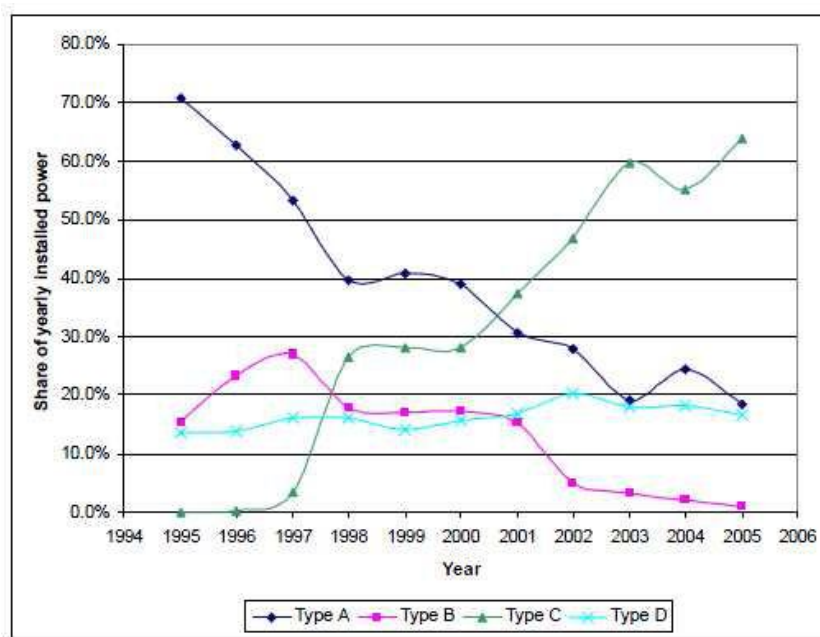


Figura 2.17 - Distribuição entre os tipos de sistemas eólicos da potência anual instalada.

Percebe-se que para os anos entre 1998 e 2000 a porcentagem de potência instalada para os quatro tipos de sistemas permaneceu inalterada. Mudanças abruptas da potência instalada ocorreram antes de 1998 e depois de 2000. O interesse de fabricação de turbinas operando com velocidade fixa (tipo A) caiu de 70% em 1995 para menos de 20% em 2005. A penetração no mercado do sistema de velocidade limitada (Tipo B), desde 1997, decaiu em favor dos sistemas DFIG (Tipo C). Fica claro na figura que sistemas do Tipo B estão sendo retirados do mercado. A configuração do tipo C foi inicialmente utilizada em 1996 pela Tacke e desde então vem conquistando espaço no mercado. A partir de 2001, sistemas do tipo C passaram a ter uma maior preferência em relação aos do tipo A. Sistemas do tipo D sempre tiveram sua produção equilibrada ao longo dos anos e possuem uma parcela considerável da potência eólica mundial instalada, fato que pode ser visualizado na Figura 2.18.

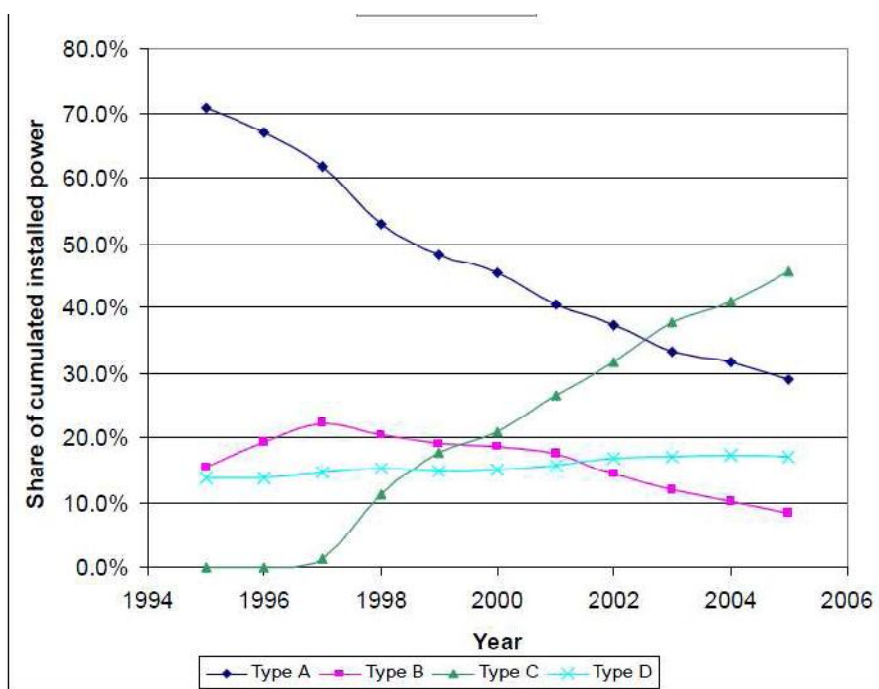


Figura 2.18 – Distribuição entre os tipos de sistemas eólicos da potência total instalada.

Com a forte queda de produção de turbinas do tipo A e do tipo B, a tendência de construção de usinas eólicas de grande e médio porte, o avanço da tecnologia da eletrônica de potência e a consolidação das técnicas de controle para sistemas eólicos, a tendência é que se invista cada vez mais na concepção de aerogeradores operando com velocidade variável do tipo C e D.

2.6 Modelos de Turbinas Eólicas

Hoje existem dois modelos principais no mercado em se tratando de turbinas eólicas modernas: turbina eólica de eixo vertical (TEEV) e turbina eólica de eixo horizontal (TEEH).

2.6.1 Turbina Eólica de Eixo Vertical

As turbinas eólicas de eixo vertical são mais raras. 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. 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. Além disso, possui acentuada vibração em sua estrutura devido ao movimento de rotação de suas pás. 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 desvantagem em áreas de cultivo caso sejam instaladas várias turbinas. As TEEVs podem ser usadas para turbinas de pequena escala e para o bombeamento de água em áreas rurais. Os principais tipos de TEEVs são Darrieus e Savonius. As Figuras 2.19, 2.20, 2.21 e 2.22 ilustram modelos desse tipo de turbina.

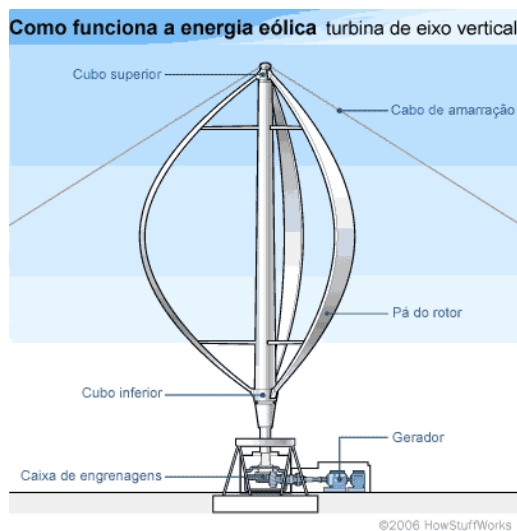


Figura 2.19 – Modelo da turbina Darrieus.
Fonte: hsw.uol.com.br



Figura 2.20 - Turbinas eólicas de eixo vertical.
Fonte: Colégio São Francisco.



Figura 2.21 - Turbina Savonius.
Fonte: Colégio São Francisco.



Figura 2.22 - Aeroerador experimental de eixo vertical.
Fonte: Colégio São Francisco.

2.6.2 Turbina Eólica de Eixo Horizontal

Como o nome indica, o eixo da TEEH é montado horizontalmente, paralelo ao solo. TEEHs são as mais comuns, de maior utilização e comercialização mundial. 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 vários metros de altura. A imagem de uma TEEH pode ser vista na Figura 2.23.



Figura 2.23 – Modelo de turbina de eixo horizontal.

2.6.2.1 Principais Componentes de uma TEEH

As principais configurações de uma turbina de eixo horizontal podem ser vistas na Figura 2.24. Estes aerogeradores são diferenciados pelo tamanho e formato da nacelle, pela presença ou não de uma caixa multiplicadora e pelo tipo de gerador utilizado (convencional ou multipolos).

A seguir são apresentados os principais componentes do aerogerador de eixo horizontal que são, de uma maneira bem geral: a torre, a nacelle (que inclui o gerador elétrico, já abordado anteriormente, e alguns outros itens), as pás do rotor e o eixo, além dos sistemas de controle.

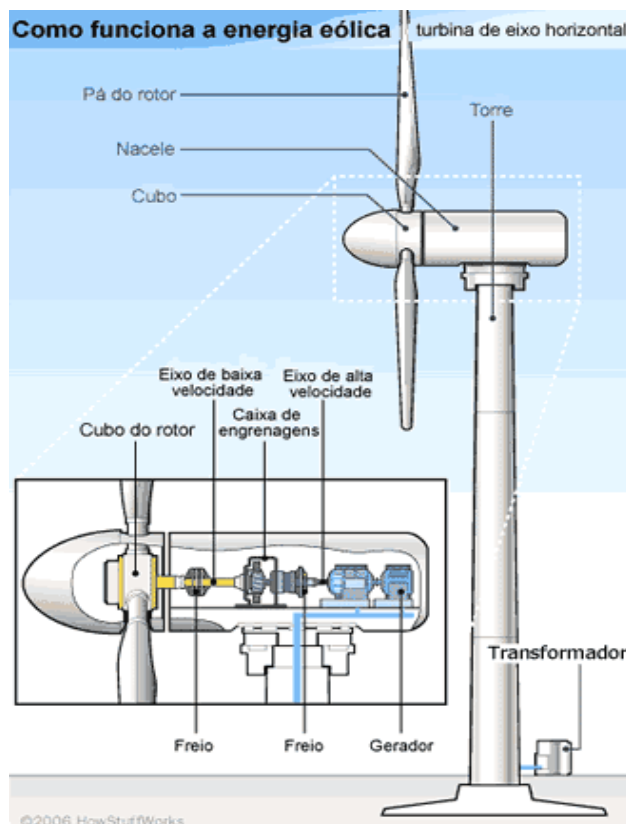


Figura 2.24 – Partes componentes de um aerogerador com eixo horizontal.
Fonte: hsw.uol.com.br

A. Pás do Rotor

As pás são perfis aerodinâmicos responsáveis pela interação com o vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico rotacional no eixo. Inicialmente fabricadas em alumínio, atualmente são fabricadas em fibras de vidro reforçadas com epóxi. Nos aerogeradores que usam controle de velocidade por passo, a pá dispõe de rolamentos em sua base para que possa girar, modificando assim seu ângulo de ataque.

As pás são fixadas através de flanges em uma estrutura metálica na frente do aerogerador, denominada cubo. Esta estrutura é construída em aço ou liga de alta resistência. Para os aerogeradores que utilizam o controle de velocidade por passo, o cubo, além de apresentar os

rolamentos para fixação das pás, também acomoda os mecanismos e motores para o ajuste do ângulo de ataque de todas as pás.

B. Nacele

É uma carcaça montada sobre a torre que abriga as partes componentes do sistema de geração de energia como gerador e caixa multiplicadora (nos modelos que a utilizam), além do eixo e dos freios do sistema.

C. 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. No caso da existência de uma caixa de engrenagens, a rotação é a mesma tanto numa ponta do eixo como na outra. Se não existir a caixa multiplicadora, a rotação do eixo é menor na extremidade do rotor e depois do sistema de engrenagens a rotação do eixo é elevada e adaptada à rotação do gerador elétrico.

D. Freios

Os freios detêm a rotação do eixo do rotor em caso de sobrecarga de energia ou algum outro tipo de falha no sistema. Esses freios podem ser acionados de maneira manual, ou mais comumente, pelos acionadores dos sistemas de controle.

E. Caixa Multiplicadora

O sistema de transmissão, que engloba a caixa multiplicadora, possui a finalidade de transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do cubo do rotor até o gerador. É composta por eixos, mancais, engrenagens de transmissão e acoplamentos.

Como a velocidade angular dos rotores das turbinas, em regra geral, varia entre 20 e 150 RPM, e os geradores têm velocidade de trabalho entre 1200 e 1800 RPM, é necessário, comumente, um sistema de engrenagens para a multiplicação da velocidade entre os eixos do rotor e do gerador. Entretanto, existem aerogeradores em que não há a presença dessa caixa

multiplicadora. Nesse caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga utilizando-se geradores multipolos de baixa velocidade e grandes dimensões.

F. Torre

Item necessário para sustentar e posicionar o rotor em sua correta posição (a uma altura onde as pás possam girar com segurança e distantes do solo) e capaz de sustentar o grande peso das partes componentes do sistema de geração de energia que ficam na nacela. É responsável por grande parte do custo final da instalação do sistema eólico.

Nos primeiros sistemas, foram utilizadas torres de metal treliçado. Porém, com geradores mais potentes e nacelas de maior dimensão, ocorre um grande incremento no peso. Para maior mobilidade e segurança, passou-se a utilizar torres de metal tubular ou de concreto, cuja sustentação pode ser auxiliada por cabos tensores.

G. Sistemas de Controle Aerodinâmico da Potência

As turbinas eólicas são projetadas de maneira que atinjam e consigam manter a potência nominal o máximo de tempo possível. Para isso é necessário obter uma mesma potência de saída para diversos valores distintos de velocidades do vento (Observar Figura 2.25). Da mesma forma devem ser previstos dispositivos de limitação das forças aerodinâmicas geradas nas pás da turbina para se evitar esforços excessivos nos componentes mecânicos para ventos de velocidade elevada. Para isto, o atual estágio de desenvolvimento das turbinas eólicas oferece três formas construtivas que permitem o controle da potência gerada no rotor:

- **Estol (Stall) ou Controle Passivo de Perda de Eficiência Aerodinâmica:** Sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás são montadas no rotor em um ângulo fixo, mas esse ângulo é projetado de modo que a torção das próprias pás aplique a frenagem quando os ventos excederem a velocidade nominal. As pás estão dispostas em um dado ângulo, assim os ventos acima de uma 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. Antigamente, a maioria dos aerogeradores utilizava esse controle;

- **Passo (Pitch):** Sistema ativo que reage em obediência à informação do controlador eletrônico do sistema que monitora a geração de potência. Com velocidades do vento acima da nominal, a geração de potência será excessiva a ponto de o controlador ordenar que as pás alterem seu ângulo de passo, de modo que fiquem desalinhadas com o vento. Isto diminui as forças aerodinâmicas atuantes e conseqüentemente a rotação das pás e a potência gerada. Os sistemas de controle de passo requerem que o ângulo de montagem das pás no rotor seja ajustável. Atualmente, com o aumento do tamanho dos rotores, os fabricantes estão optando pelo controle de passo que oferece maior flexibilidade na operação das turbinas eólicas;

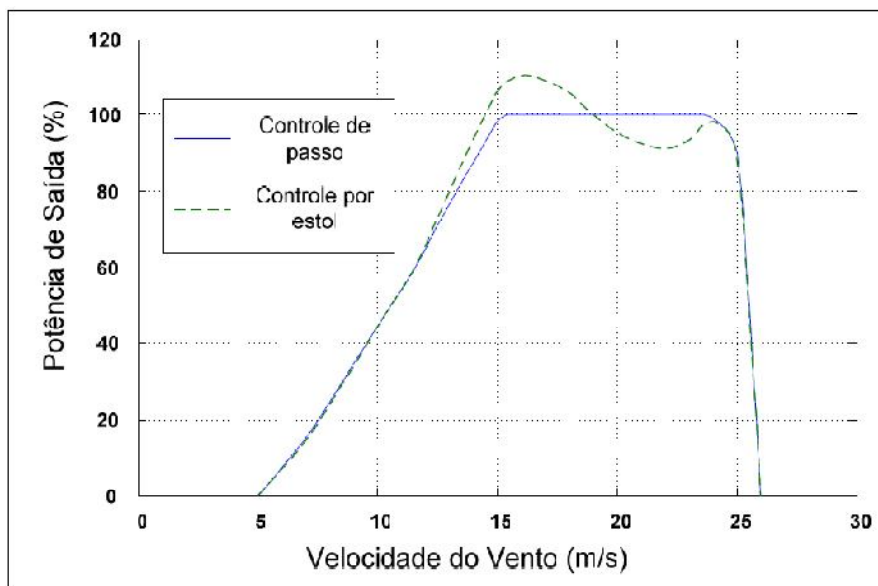


Figura 2.25 – Variação da potência de saída com a velocidade do vento em turbina com controle de passo e controle por estol.

- **Controle Ativo de Perda de Eficiência Aerodinâmica (Estol Ativo):** 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. Esse é um sistema híbrido em relação aos outros dois tipos de controle e hoje é bastante utilizado nos aerogeradores mais modernos.

2.7 Aplicação

O princípio eólico pode ser utilizado em sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. Esses mecanismos devem ser dimensionados e instalados conforme as condições climáticas, geográficas e demandas existentes. Sua instalação poderá ser em terra (ONSHORE) ou no mar (OFFSHORE). Os sistemas ONSHORE são as conhecidas e tradicionais fazendas eólicas ou simplesmente parques eólicos.

2.7.1 Sistemas OFFSHORE

As instalações desse tipo, apesar do maior custo de transporte, instalação e manutenção, apresentam a vantagem de disporem de ventos mais velozes e de melhor regime. Sua utilização vem aumentando, consideravelmente, na Europa, que já não dispõe de áreas adequadas para esse fim (restrições ambientais sobre a utilização do solo). Tem havido grandes investimentos tecnológicos, destinados à adaptação das turbinas eólicas convencionais para uso no mar. Os projetos offshore necessitam de estratégias especiais quanto ao tipo de transporte das máquinas, instalação e operação e todo projeto deve ser coordenado de forma a utilizarem os períodos onde as condições marítimas propiciem um deslocamento e uma instalação com segurança. As Figuras 2.26 e 2.27 ilustram exemplos de parques eólicos offshore.



Figura 2.26 – Parque eólico offshore Gunfleet Sands de 172 MW, localizado no estuário do rio Tamisa no Reino Unido.

Fonte: mybelojardim.com



Figura 2.27 - Usina eólica de Horns Rev com capacidade de 160 MW, no litoral da Dinamarca.

Fonte: lambaritalia.blogspot.com

2.7.2 Utilizações dos Sistemas Eólicos

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

Quando da aplicação do sistema, é necessária a observação dos equipamentos destinados à utilização da energia fornecida. Em sistemas autônomos isolados, de pequeno porte, utilizam-

se aparelhos de baixa tensão e corrente contínua (CC). Para equipamentos que operam em corrente alternada (CA), como os eletrodomésticos convencionais, usa-se um inversor.

2.7.2.1 Sistemas Isolados

Em geral, esses sistemas apresentam uma forma de armazenamento de energia que pode ser feito através de baterias, ou por meio de energia potencial gravitacional, com elevação de água, até um reservatório, para utilização posterior. O armazenamento de energia não é utilizado no caso de irrigação direta, pois em tal caso a água é toda utilizada nessa atividade.

Os sistemas que armazenam energia em baterias necessitam de um dispositivo para controlar a carga e a descarga da bateria. O controlador de carga tem como principal objetivo evitar danos à bateria por sobrecarga ou descarga profunda. Um exemplo desse sistema é observado na Figura 2.28.

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

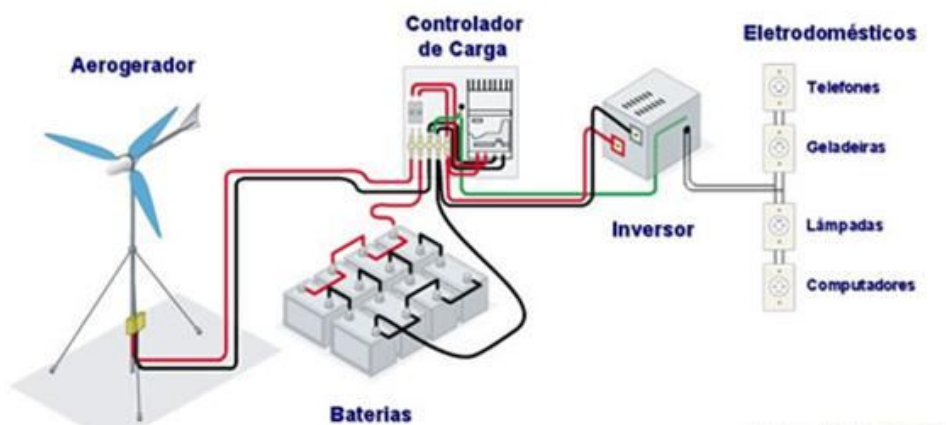


Figura 2.28 - Configuração de um sistema eólico isolado.
Fonte: CRESESB.

2.7.2.2 Sistemas Híbridos

Quando desconectados da rede convencional, esses sistemas utilizam fontes de geração de energia alternativa, como turbinas eólicas, geradores movidos a diesel, módulos fotovoltaicos,

entre outros. É um sistema de maior complexidade para a utilização e melhoria das várias fontes energéticas, o que exige um controle de todos os mananciais do sistema. Em geral, os sistemas híbridos são utilizados em usinas de médio e grande porte. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Um exemplo desse sistema é apresentado na Figura 2.29.

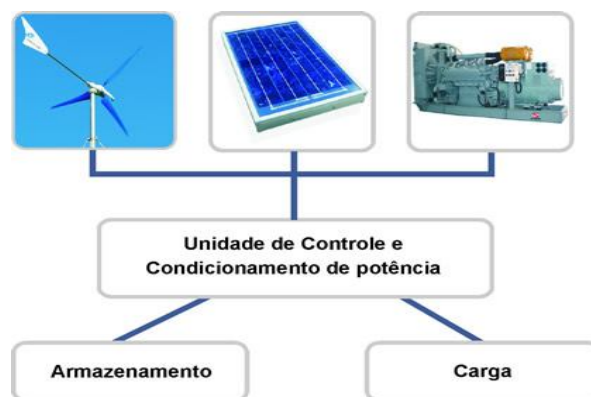


Figura 2.29 – Configuração de um sistema híbrido solar-eólico-diesel.
Fonte: CRESESB.

2.7.2.3 Sistemas Integrados à Rede Elétrica

Apresentam aerogeradores em grande número, geralmente de grande potência individual, não necessitando de sistemas de armazenamento de energia, tendo-se em vista que toda a geração será disponibilizada à rede elétrica. O total de potência instalada no mundo com sistemas eólicos interligados à rede soma aproximadamente 132 GW (WWEA, 2010).

2.7.3 Armazenamento da Energia Eólica

O armazenamento de energia se justifica por razões de economia: Nos momentos em que a demanda for maior que a capacidade geradora, utiliza-se uma parte da reserva; quando a produção for superior à demanda, armazena-se o excedente. Pode-se afirmar que, quando se utiliza a energia eólica, no sistema integrado, diminui-se a dependência de energias provenientes das fontes tradicionais, como a hidráulica e a térmica (a carvão ou óleo). Há, por conseguinte, uma preservação dos recursos utilizados por essas fontes, pelo armazenamento do potencial eólico.

A energia eólica pode ser armazenada diretamente em baterias e supercapacitores, mas também pode ser preservada através da conversão em outro tipo de energia armazenável, principalmente a mecânica.

2.7.4 Qualidade da Energia

A qualidade de energia no contexto da geração eólica descreve o desempenho elétrico do sistema de geração de eletricidade do aerogerador onde quaisquer perturbações sobre a rede elétrica devem ser mantidas dentro de limites técnicos estabelecidos conforme o nível de exigências da rede alimentada.

Para a maior parte das aplicações de unidades eólicas, a rede pode ser considerada como um componente capaz de absorver toda a potência gerada por estas unidades, com tensão e frequência constantes. No caso, por exemplo, de sistemas isolados de pequeno porte, podem ser encontradas situações onde a potência elétrica fornecida pelo aerogerador alcance valores compatíveis com a capacidade da rede. Onde a rede é fraca, a qualidade da energia deve ser uma das principais questões a serem observadas sobre a utilização de aerogeradores.

A Tabela 1 descreve os principais distúrbios causados por aerogeradores na rede elétrica e as respectivas causas, que podem ser resumidas em condições meteorológicas, do terreno, e especificamente sobre as características elétricas, aerodinâmicas, mecânicas e de controle presente no aerogerador.

Tabela 1 – Distúrbios causados por turbinas eólicas à rede elétrica (CARVALHO, 2003).

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

É importante observar que os cuidados na conexão à rede elétrica devem ser observados e avaliados ainda na fase de planejamento. Quando várias máquinas eólicas são conectadas em um

parque, o nível de potência entregue por unidade pode variar devido à localização das máquinas no parque e o efeito de “sombra” causado pelos aerogeradores a montante àqueles que se encontram em fileiras mais afastadas em relação à direção do vento predominante.

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

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

2.7.5 Meio Ambiente

É conhecido que a queima de combustíveis de origem fóssil produz dióxido de carbono, contribuindo efetivamente para o aquecimento global. Pode-se dizer que a energia eólica é limpa, não advém da queima de fósseis e não emite poluentes. Constitui-se, portanto, em uma alternativa complementar às outras fontes de energia.

Entretanto, as fazendas eólicas apresentam alguns pequenos impactos ambientais. Podem vir a ameaçar pássaros, no caso de instalação realizada em rotas de migração. Alteram paisagens com suas torres e hélices e cria-se uma poluição visual, mas podem se integrar de tal modo ao ambiente virando até atrações turísticas. Existe ainda a possibilidade de causar interferência na transmissão de sinais de televisão. Emitem ruídos (de baixa frequência), que podem causar algum incômodo. Doravante, esses impactos podem ser facilmente minimizados, com o aperfeiçoamento tecnológico.

Os parques eólicos apresentam, entre diversos fatores positivos, a vantagem de não exigir a desapropriação de grandes áreas, com deslocamentos populacionais, além de preservar os espaços utilizados pela agricultura local.

Se não é a solução definitiva para as ameaças de mudanças climáticas, a energia eólica é um fator bastante atenuante, conforme o relatório Wind Force 12, elaborado pelo Greenpeace e o Conselho Global de Energia Eólica. Esse relatório demonstra que não há barreiras técnicas ou econômicas para o suprimento de 12% das necessidades globais de energia, a partir de uma matriz eólica, até o ano de 2020. A utilização dessa alternativa é ferramenta apreciável, na corrida para diminuir o efeito estufa em 12%, causado pelas emissões de gás CO₂.

Alguns países como Alemanha, Austrália, Brasil, Canadá, China, Dinamarca, Estados Unidos, França, Índia, Itália, Japão, Filipinas, Polônia, Turquia e Reino Unido são peças-chave no papel de liderança, para o crescimento da geração e utilização em larga escala da energia eólica. Na América Latina, o Brasil é apontado como o mercado mais promissor para o desenvolvimento dessa alternativa energética.

2.7.5.1 Selo para Identificação de Produtos Feitos com Uso de Energia Eólica

O Conselho Global de Energia Eólica anunciou em janeiro de 2010 o lançamento do selo WindMade, criado para identificar produtos fabricados com o uso de energia eólica. A medida é resultado de uma parceria entre a entidade, a organização ambientalista WWF, a fornecedora de aerogeradores Vestas e outras empresas do setor.

A etiqueta é a primeira iniciativa global nesse sentido e tem como objetivo oferecer ao consumidor o poder de escolha por um produto ambientalmente sustentável. A ideia é atender a demanda dos consumidores que queiram fazer algo contra a mudança climática escolhendo produtos mais ecologicamente corretos, principalmente em países onde a maior parte da energia elétrica vem da queima de combustíveis fósseis.

3 CAPÍTULO 3 - DADOS GERAIS DA ENERGIA EÓLICA

Para se fazer uma avaliação do potencial de uma determinada região, é necessário coletar e depois analisar os dados sobre as condições dos ventos desse lugar. Nesse sentido, são feitos levantamentos específicos, podendo os dados disponíveis em aeroportos, estações meteorológicas, entre outras fontes, fornecer um perfil básico do potencial disponível de aproveitamento da energia eólica. É tecnicamente aproveitável uma densidade maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m, o que remete a uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s. Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta essa velocidade mínima necessária, na altura estabelecida. De acordo com a Tabela 2, a distribuição desse potencial não é uniforme.

É estimado como viável um potencial mundial na ordem de 500.000 TWh/ano. Contudo, levando-se em conta as restrições socioambientais, o potencial utilizável estaria em torno de 10% do total, correspondente a aproximadamente quatro vezes o consumo mundial de energia elétrica.

Tabela 2 - Potencial Mundial.

Região	% Terra ocupada*	Potencial Bruto (TWh/ano)	Potencial Líquido (TWh/ano)
África	24	106.000	10.600
Austrália	17	30.000	3.000
América do Norte	35	139.000	14.000
América Latina	18	54.000	5.400
Europa Ocidental	42	31.400	4.800
Europa Oriental e Ex-URSS	29	106.000	10.600
Ásia (Excluindo-se a ex-URSS)	9	32.000	4.900
Mundo**	23	498.400	53.000

*Em relação ao potencial bruto;

**Excluindo-se Groenlândia, Antártida, a maioria das ilhas e os recursos offshore.

Fonte: ANEEL (2010).

3.1 Energia Eólica no Mundo

O perfil do crescimento da energia eólica nos últimos anos indica perspectivas promissoras para o crescimento mundial dessa “indústria” nas próximas décadas. A procura por

novos mercados e o desenvolvimento de aerogeradores de maior porte, mostram boas tendências para um crescimento mais sustentável. Em alguns países e regiões, o vento tem se tornado numa das maiores fontes da eletricidade gerada como no caso da Dinamarca (20%), Portugal (15%), Espanha (14%) e Alemanha (9%).

De acordo com a Associação Mundial de Energia Eólica (WWEA, na sigla em inglês), o mercado mundial de turbinas eólicas continua aquecido e mostrou um crescimento robusto na primeira metade do ano de 2010, com aproximadamente 16 GW de potência adicionada no mundo inteiro. Novamente, a China representa o maior crescimento do mercado e agregou 7800 MW em somente seis meses, chegando perto de 34 GW no total de suas instalações eólicas. Os Estados Unidos que continuam sendo o maior em capacidade instalada com 36 GW, viram um decréscimo em suas novas instalações e adicionaram 1200 MW. Esse mesmo valor foi agregado pela Índia que agora possui 12,1 GW no total. Os cinco maiores do mercado Europeu mostraram um crescimento similar: Alemanha adicionou 660 MW, França e Reino Unido 500 MW cada, Itália 450 MW e Espanha 400 MW. A capacidade total de todas as turbinas eólicas instaladas pelo mundo cresceu para 175 GW até a metade do ano de 2010, comparado com 159 GW que existia até o final de 2009 (WWEA).

Na próxima atualização de dados da Associação Mundial de Energia Eólica, espera-se que o mercado eólico atinja um crescimento total no ano de 2010 entre 35 e 40 GW, frente ao incremento de 38 GW do ano de 2009. Isso elevaria a capacidade global até quase 200 GW. Também se espera que a China incremente um total de 15 GW no ano de 2010 e isso a tornaria no maior país em termos de capacidade total eólica instalada, ultrapassando os Estados Unidos. Na Tabela 3, encontram-se algumas informações referentes aos dez maiores países geradores de energia eólica.

Tabela 3 – Potência eólica instalada pelo mundo até junho de 2010.

Colocação mundial	País	Capacidade total (MW) junho de 2010	Capacidade adicionada (MW) junho de 2010	Capacidade total (MW) final de 2009
1	Estados Unidos	36.300	1.200	35.159
2	China	33.800	7.800	26.010
3	Alemanha	26.400	660	25.777
4	Espanha	19.500	400	19.149
5	Índia	12.100	1.200	10.925
6	Itália	5.300	450	4.850
7	França	5.000	500	4.521
8	Reino Unido	4.600	500	4.092

9	Portugal	3.800	230	3.535
10	Dinamarca	3.700	190	3.497
	Resto do mundo	24.500	2.870	21.698
Total		175.000	16.000	159.213

Fonte: WWEA (2011).

Alguns dados divulgados pela WWEA em 2010:

- A tendência da capacidade de geração eólica é dobrar a cada três anos;
- Em 2009 houve um crescimento de 31,7%, o maior desde 2001 em termos percentuais;
- Todas as turbinas eólicas instaladas até o final de 2009 geram 340 TWh por ano, equivalente à demanda elétrica total da Itália ou à 2% do consumo global de eletricidade;
- O setor eólico movimentou a economia em US\$ 70 bilhões em 2009;
- O mercado eólico empregou 550.000 pessoas ao redor do mundo. A perspectiva é que esse setor ofereça até 1.000.000 de postos de trabalho até 2012;
- A China continua sendo a locomotiva desse setor no mercado internacional, mais que dobrando suas instalações pelo quarto ano consecutivo;
- Em 2009, a Ásia teve o maior crescimento em termos continentais com 40,4%, seguido pela América do Norte com 28,4% e Europa voltando ao terceiro lugar com 27,3%;
- Na América Latina, em 2009 também, o Brasil e o México foram os grandes desbravadores desse setor;
- Baseado no acelerado desenvolvimento e crescimento desse setor e nas políticas de incentivo que deverão ser adotadas, a WWEA projeta uma capacidade total instalada em torno de 1,9 TW como sendo possível até o ano de 2020.

A seguir, a Figura 3.1 mostra a evolução da capacidade eólica total (em MW) instalada no mundo desde 2001. A Figura 3.2 mostra a evolução da potência eólica adicionada a cada ano no mundo desde 2001 e a Figura 3.3 representa a evolução das taxas de crescimento eólico no mercado mundial desde 1998.

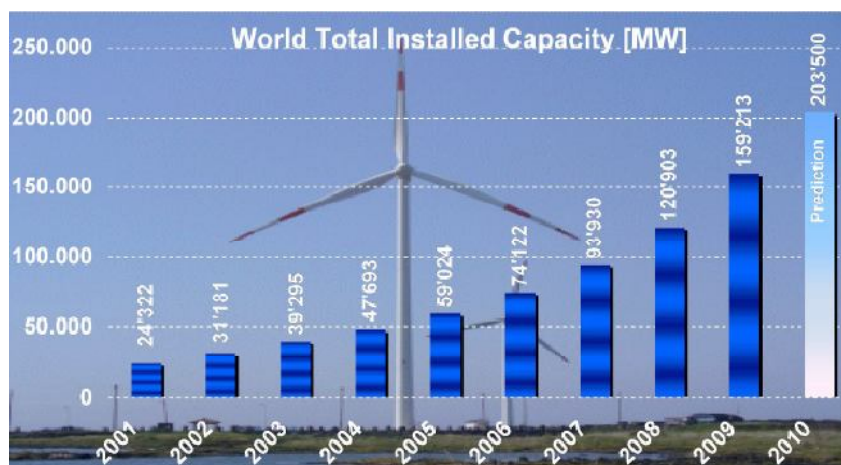


Figura 3.1 – Evolução da potência eólica total instalada no mundo desde 2001 (WWEA, 2011).

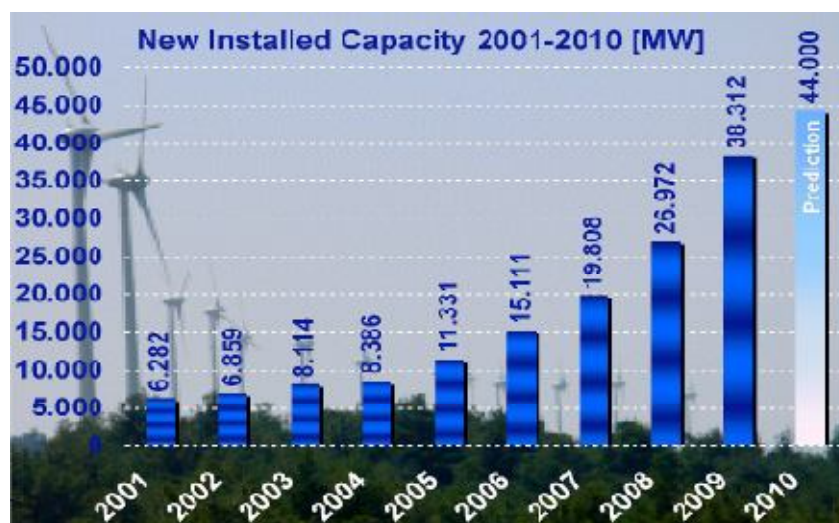


Figura 3.2 – Evolução da potência eólica adicionada a cada ano no mundo desde 2001 (WWEA, 2011).

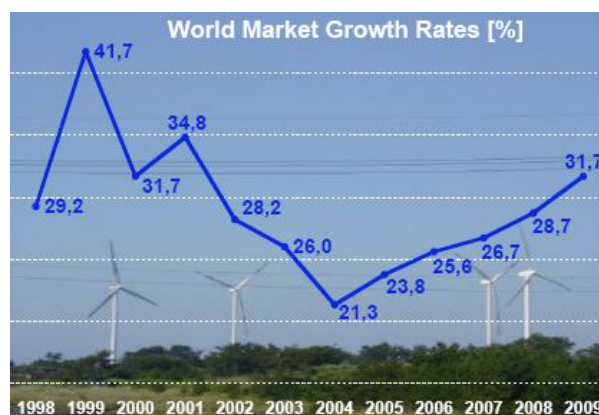


Figura 3.3 – Evolução das taxas de crescimento eólico no mercado mundial desde 1998 (WWEA, 2011).

A Figura 3.4 mostra os dez países com as maiores taxas de crescimento eólico em 2009, a Figura 3.5 mostra os dez maiores países em termos de capacidade eólica instalada até 2009, a Figura 3.6 exibe a distribuição percentual da potência eólica adicionada em 2009 e a Figura 3.7 exibe a distribuição percentual da potência eólica total instalada até 2009.

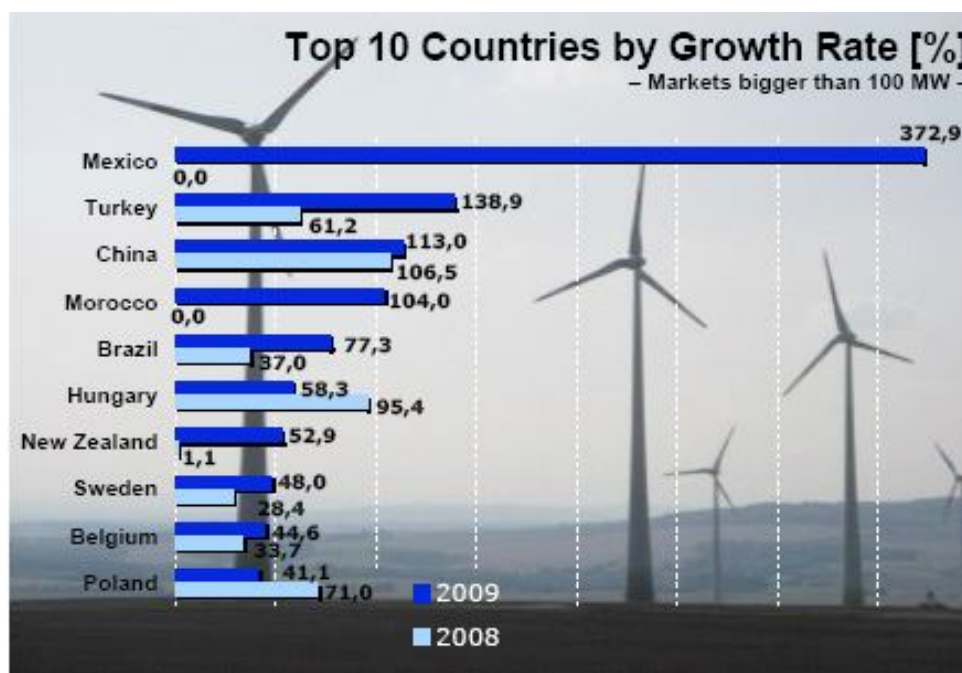


Figura 3.4 – Os dez países com as maiores taxas de crescimento eólico no mercado mundial em 2009 (WWEA, 2011).



Figura 3.5 – Os dez maiores países em termos de capacidade eólica instalada até 2009 (WWEA, 2011).

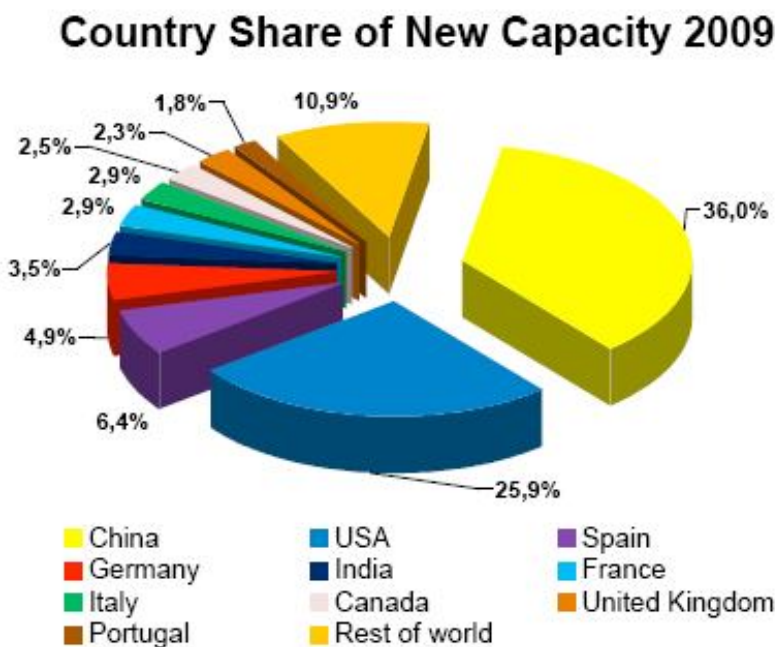


Figura 3.6 – Distribuição percentual da potência eólica adicionada em 2009 (WWEA, 2011).

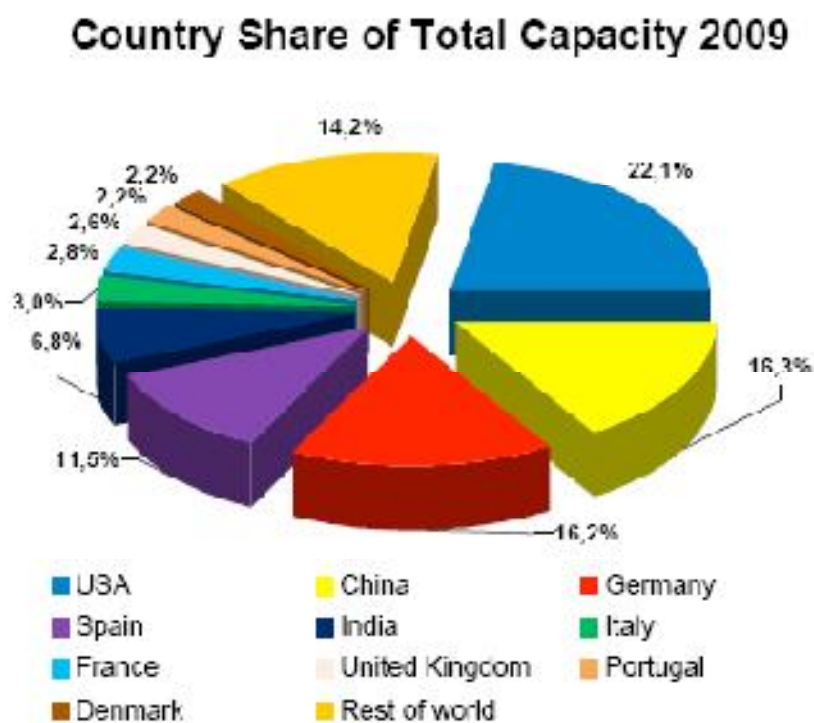


Figura 3.7 – Distribuição percentual da potência eólica total instalada até 2009 (WWEA, 2011).

A Figura 3.8 mostra os cinco países com os maiores sistemas offshore até 2009 e a Tabela 4 os 12 países que possuem redes offshore até 2009. A Figura 3.9 trata da geração de empregos pelas empresas do setor eólico desde 2005.

As Figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 e a Tabela 5 mostram as taxas de crescimento do setor eólico nos continentes, bem como a distribuição percentual desse crescimento e da potência total instalada e as tendências de crescimento de cada continente.



Figura 3.8 – Os cinco países com os maiores sistemas offshore até 2009 (WWEA, 2011).

Tabela 4 – Países com as maiores redes offshore do mundo até 2009 (WWEA, 2011).

Posição em 2009	País	Total de capacidade offshore instalada (MW) até 2009	Capacidade offshore adicionada (MW) em 2009	Total de capacidade offshore instalada (MW) até 2008	Taxa de crescimento (%)
1	Reino Unido	688,0	104,0	574,0	18,1
2	Dinamarca	663,6	237,0	426,6	55,6
3	Holanda	247,0	0,0	247,0	0,0
4	Suécia	164,0	30,0	134,0	22,4
5	Alemanha	72,0	60,0	12,0	500,0
6	Bélgica	30,0	0,0	30,0	0,0
7	Finlândia	30,0	0,0	30,0	0,0
8	Irlanda	25,0	0,0	25,0	0,0
9	China	23,0	21,0	2,0	1050,0
10	Espanha	10,0	0,0	10,0	0,0
11	Noruega	2,3	2,3	0,0	/
12	Japão	1,0	0,0	1,0	0,0
	Total	1955,9	454,3	1491,6	30,5



Figura 3.9 – Geração de empregos pelas empresas do setor eólico desde 2005 (WWEA, 2011).

Continental distribution

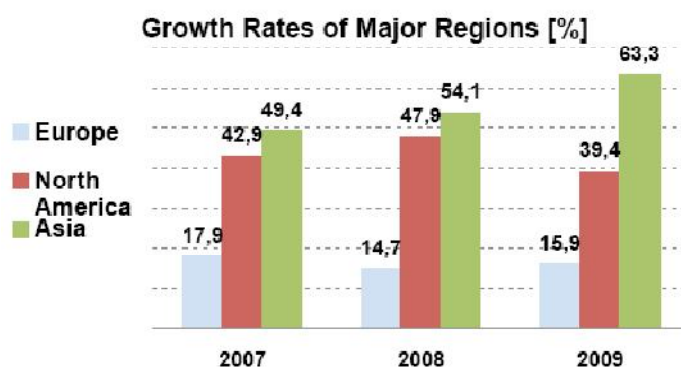


Figura 3.10 – Taxas de crescimento do setor eólico na Europa, Ásia e América do Norte (WWEA, 2011).

Continental Shares in New Capacity 2009

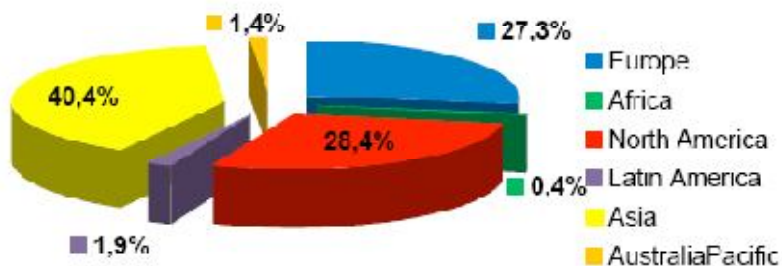


Figura 3.11 – Distribuição percentual de crescimento eólico por continente em 2009 (WWEA, 2011).

Continental Share in Total Capacity 2009

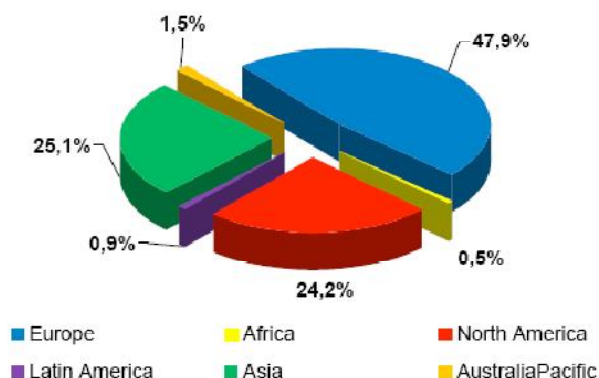


Figura 3.12 – Distribuição percentual da potência eólica total instalada por continente até 2009 (WWEA, 2011).

Continental Shares in New Wind Capacity



Figura 3.13 – Tendência percentual de crescimento eólico por continente desde 2004 (WWEA, 2011).

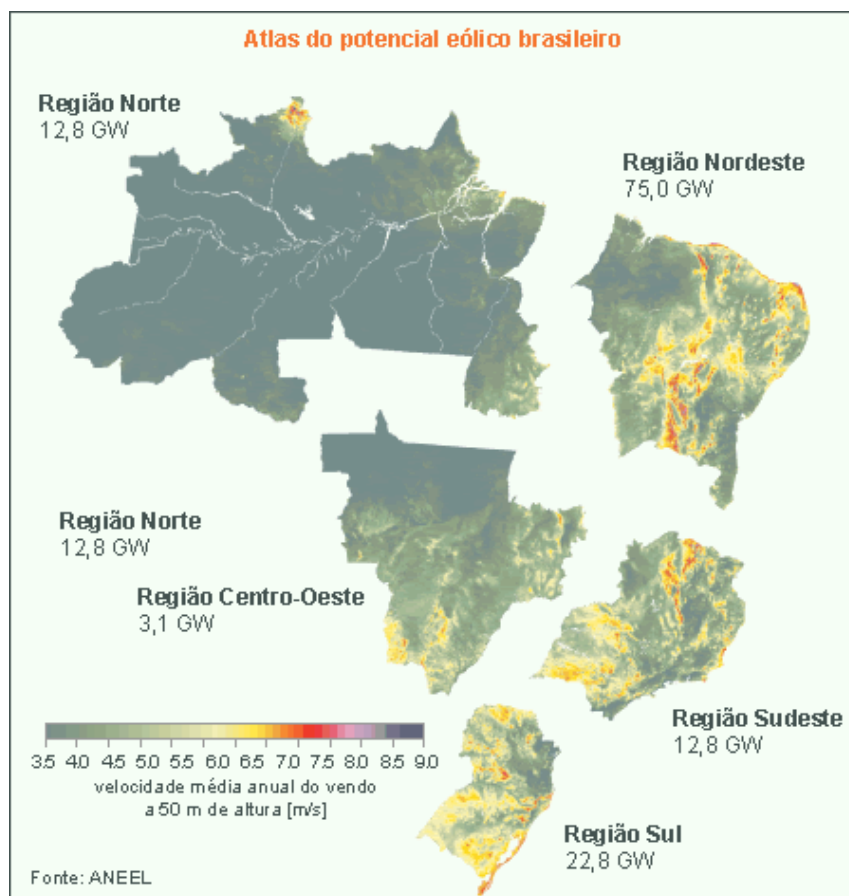
Tabela 5 – Distribuição da potência eólica instalada pelo mundo entre 2006 e 2009 (WWEA, 2011).

Total de potência eólica instalada por região (em MW)				
	2006	2007	2008	2009
África	337	501	601	770
América do Norte	13.063	18.669	27.606	38.478
América Latina	516	516	659	1.406
Ásia	10.625	15.872	24.465	39.961
Austrália e Pacífico	988	1.064	1.833	2.388
Europa	48.625	57.313	65.744	76.218

3.2 Energia Eólica no Brasil

Os especialistas e instituições ainda divergem na estimativa do potencial brasileiro, devido à falta de dados e divergências metodológicas. Estudos efetuados na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco, possibilitaram a primeira versão do Atlas Eólico da Região Nordeste. Posteriormente, estudos resultaram no Mapa do Potencial Eólico Brasileiro (Mapa 1), apresentando uma estimativa de 143,5 GW, segundo o Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel) do Ministério de Minas e Energia (MME) 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 poderia crescer em torno de 50%.

Mapa 1- Potencial Eólico (geração por região) do Brasil.



Fonte: CRESESB.

Quanto mais alto, mais potencial eólico, já que vão diminuindo os problemas com relevo e rugosidade do solo. Esse potencial de 143,5 GW representaria a geração de energia para 146 milhões de residências. Essa conta, no entanto, é só ilustrativa. A energia eólica não é energia firme, ou seja, com fornecimento constante. Assim, sua energia pode ser 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 926,89 MW, ou seja, 0,82% dos 113,37 GW gerados no país, segundo dados da Aneel de janeiro de 2011.

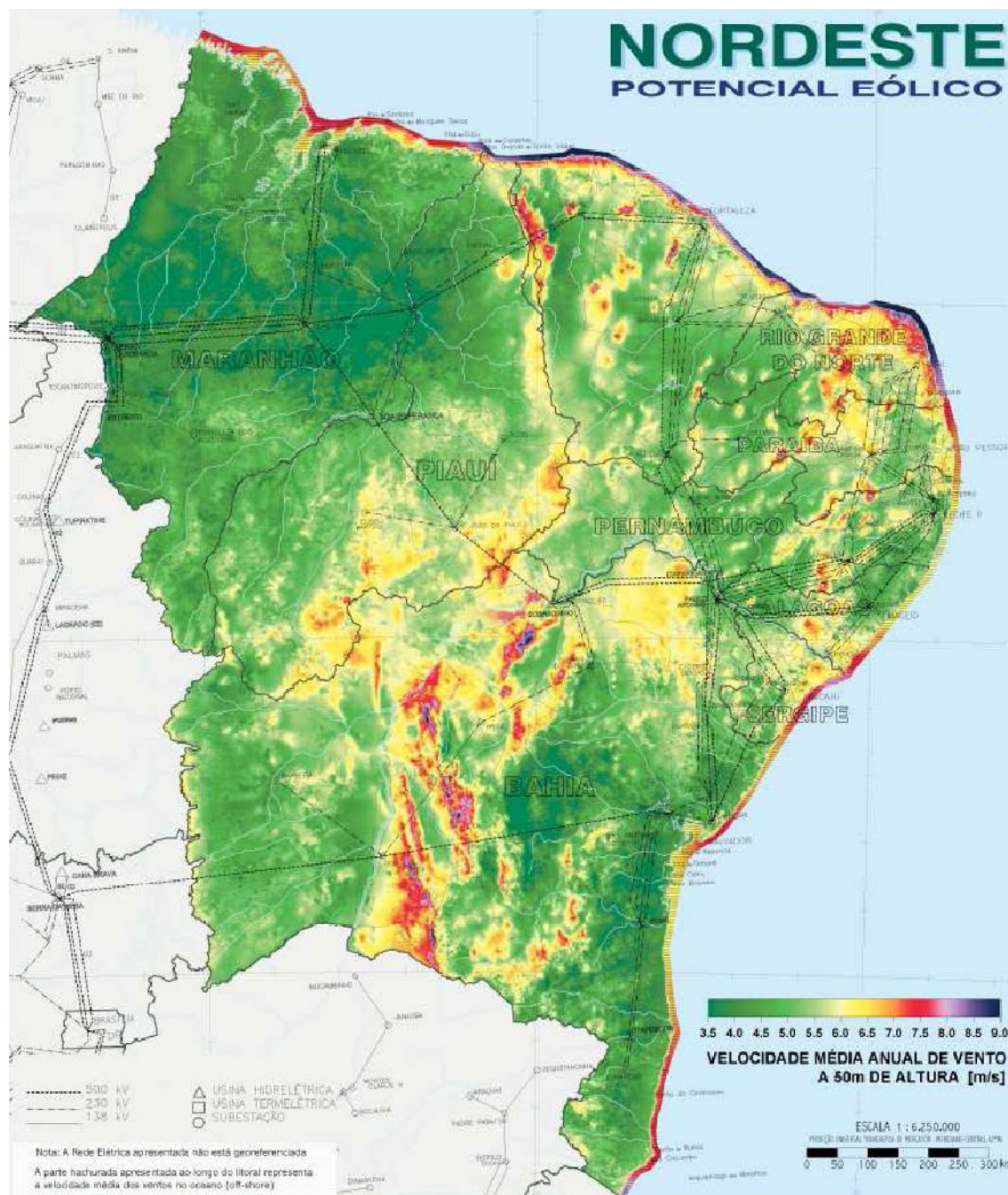
O crescimento da capacidade instalada no país se deve em grande parte pelos incentivos que o governo federal tem dado para o assunto. O PROINFA, administrado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), respalda uma linha de crédito que prevê financiamento de até 70% do investimento (desde que exista um mínimo de 60% de nacionalização no projeto), excluindo bens e serviços importados e a aquisição de terrenos.

3.2.1 Potencial Eólico do Nordeste

O Nordeste é a região com melhor complementaridade eólico-hídrico do planeta, podendo ainda suprir as demais regiões, quando da diminuição do regime de chuvas (Figuras 3.14 a 3.18). Entre os meses de junho e agosto, quando há menor vazão do Rio São Francisco, é a época em que o volume de ventos é abundante na região (Figura 3.19). O São Francisco abastece oito usinas, responsáveis por 90% da energia gerada no Nordeste.

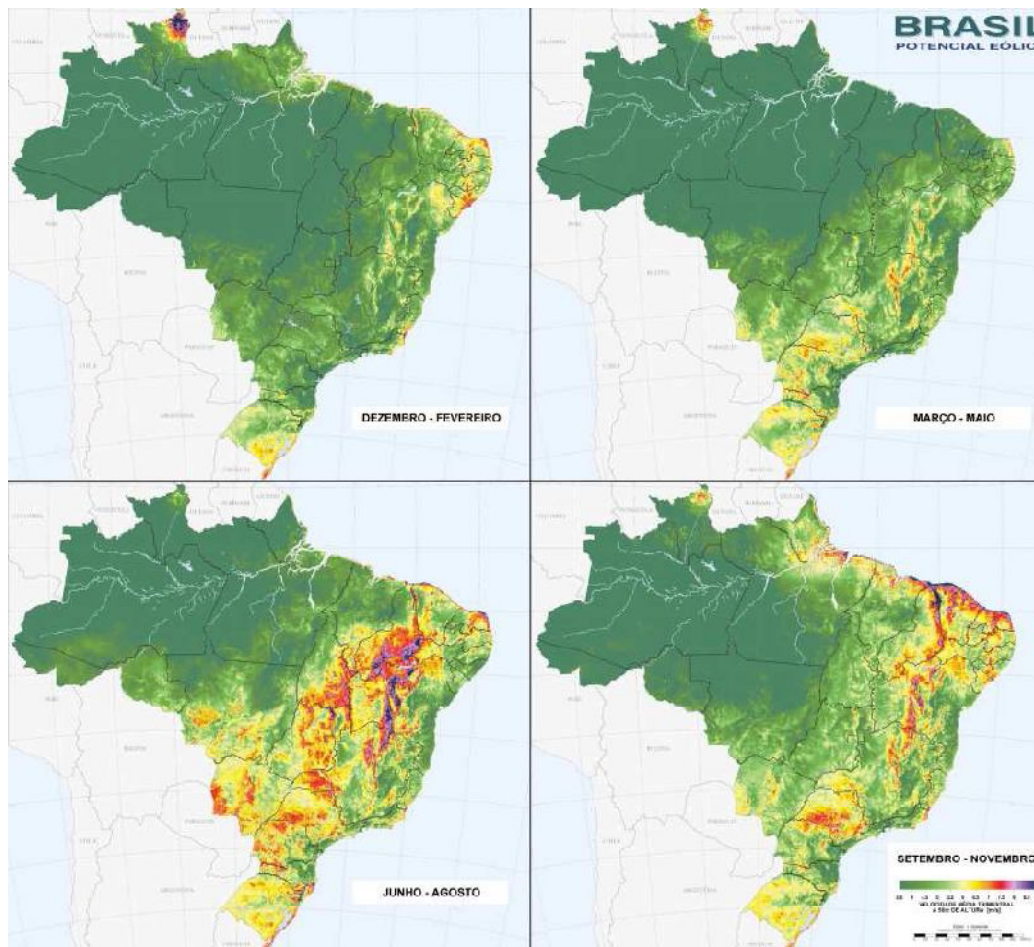
Além disso, o Nordeste apresenta mais da metade do potencial eólico Brasileiro, com um total na ordem de 75 GW, disponível no país, e que equivale a aproximadamente 4 usinas de Itaipu. Esse potencial está localizado tanto na faixa litorânea quanto no interior da região, o que possibilita uma melhor distribuição dos parques eólicos (Mapa 2). O Mapa 3 ilustra a condição eólica trimestral no Brasil.

Mapa 2 - Potencial Eólico no Nordeste.



Fonte: CRESESB.

Mapa 3 - Potencial Eólico Trimestral no Brasil.



Fonte: CRESESB.

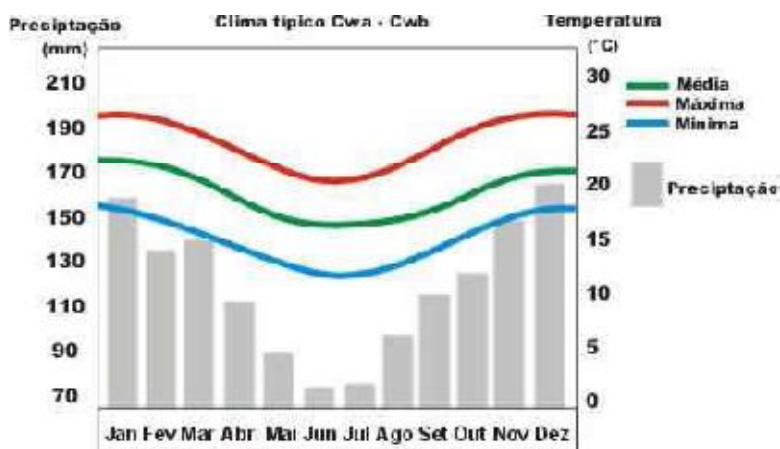


Figura 3.14 – Regime de precipitação/temperatura na região Sudeste.
Fonte: climabrasileiro.hpg.ig.com.br

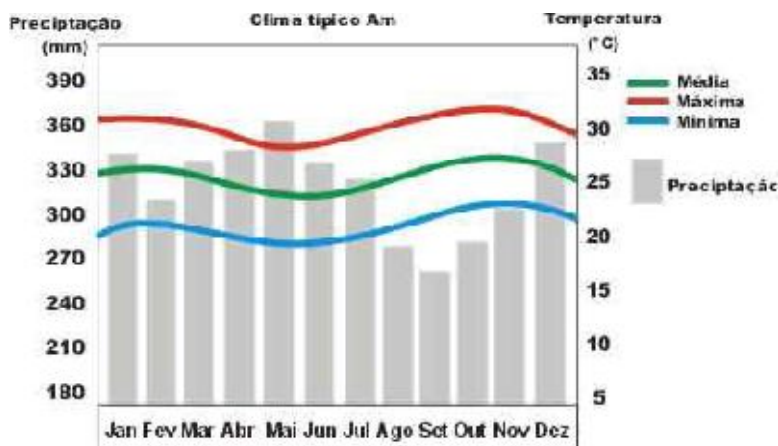


Figura 3.15 – Regime de precipitação/temperatura na região Norte.
Fonte: climabrasileiro.hpg.ig.com.br

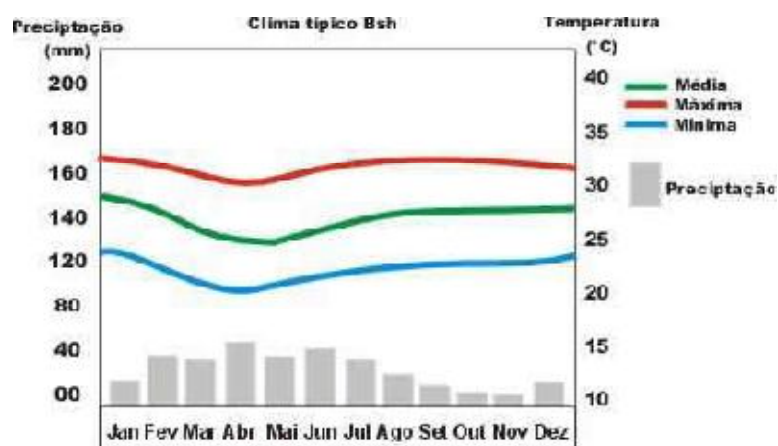


Figura 3.16 – Regime de precipitação/temperatura na região Nordeste.
Fonte: climabrasileiro.hpg.ig.com.br

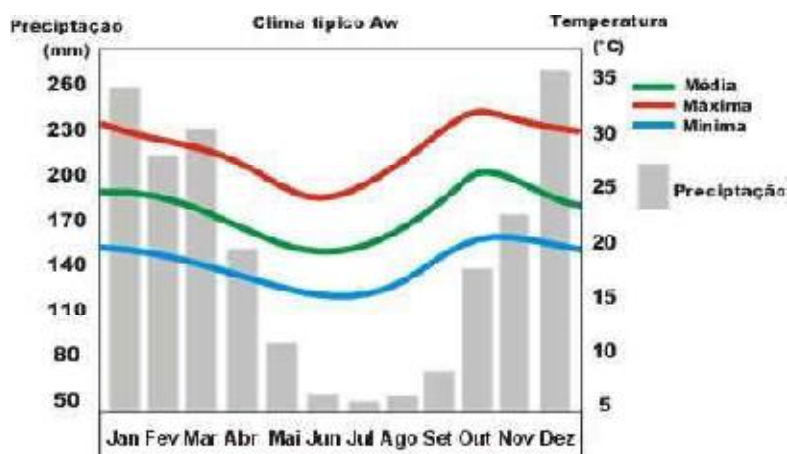


Figura 3.17 – Regime de precipitação/temperatura na região Centro-Oeste.
Fonte: climabrasileiro.hpg.ig.com.br

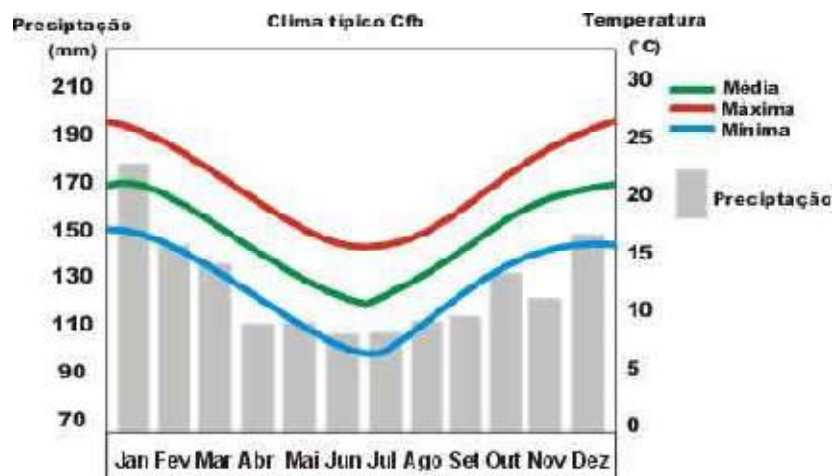


Figura 3.18 – Regime de precipitação/temperatura na região Sul.
Fonte: climabrasileiro.hpg.ig.com.br

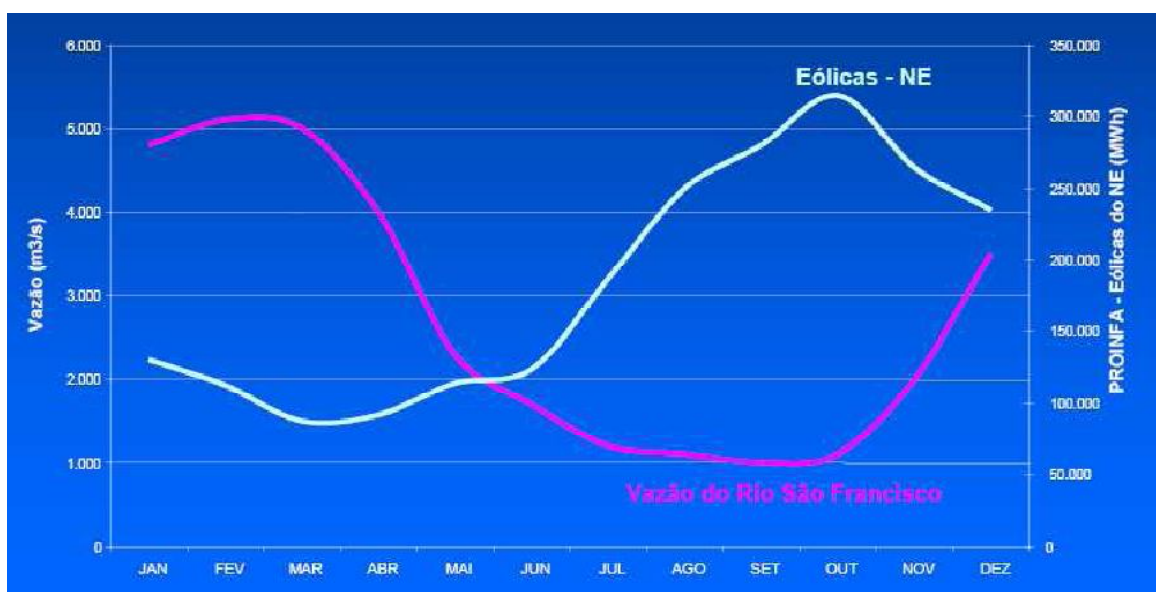


Figura 3.19 – Sazonalidade das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste.
Fonte: Eletrobrás (2008).

Verifica-se, pois, que o Nordeste apresenta amplas condições de aproveitamento da energia eólica, como uma fonte viável e abundante, a complementar a energia hidroelétrica. O excedente da produção da energia eólica pode ser armazenado nos gigantescos reservatórios das usinas, para substituírem eventuais escassezes hídricas, ou mesmo permitindo o controle da vazão, necessária à preservação das atividades agrícolas. No entanto, também se verifica que a maioria dos projetos, em construção e outorgados, infelizmente, em quantidade e potência, estão sendo direcionados para as térmicas, com queima de carvão e óleo, que poluem mais, e costumam

mais. Essa opção de investimento do Governo Brasileiro, na produção de energia, através de uma matriz energética, poluente e não renovável, está no sentido contrário ao adotado pelas potências mundiais.

3.2.2 Capacidade de Geração do Brasil

O Brasil possui no total 2.344 empreendimentos em operação, gerando 113.368.791 kW de potência. Está prevista para os próximos anos uma adição de 46.945.951 kW na capacidade de geração do país, proveniente dos 137 empreendimentos atualmente em construção e mais 474 outorgados.

Tabela 6 – Empreendimentos energéticos em operação no Brasil (ANEEL, 2011).

Empreendimentos em Operação				
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	%
CGH	328	189.719	188.118	0,17
EOL	50	930.482	926.886	0,82
PCH	388	3.469.341	3.429.612	3,03
SOL	4	86	86	0
UHE	173	77.715.187	77.022.189	67,94
UTE	1.399	31.764.672	29.794.900	26,28
UTN	2	2.007.000	2.007.000	1,77
Total	2.344	116.076.487	113.368.791	100

Os valores de porcentagem são referentes à potência fiscalizada. A potência outorgada é igual a considerada no ato de outorga. A potência fiscalizada é igual a considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

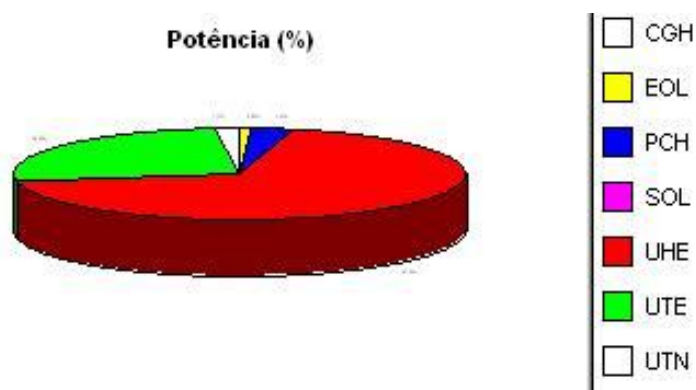


Figura 3.20 – Distribuição dos empreendimentos energéticos em operação no Brasil.

Tabela 7 – Empreendimentos energéticos em construção no Brasil (ANEEL, 2011).

Empreendimentos em Construção			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	1	848	0,01
EOL	19	507.100	3,31
PCH	62	801.268	5,22
UHE	12	8.863.500	57,79
UTE	42	3.814.053	24,87
UTN	1	1.350.000	8,80
Total	137	15.336.769	100

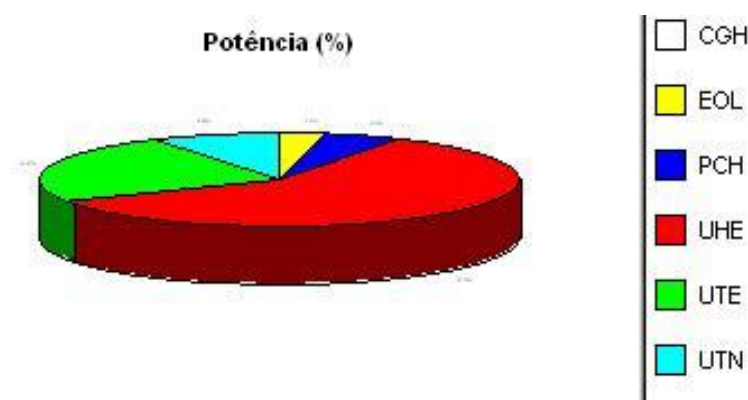


Figura 3.21 – Distribuição dos empreendimentos energéticos em construção no Brasil.

Tabela 8 – Empreendimentos energéticos outorgados no Brasil (ANEEL, 2011).

Empreendimentos Outorgados entre 1998 e 2010 (não iniciaram sua construção)			
Tipo	Quantidade	Potência Outorgada (kW)	%
CGH	69	45.630	0,14
CGU	1	50	0
EOL	83	2.835.031	8,97
PCH	146	2.031.769	6,43
SOL	1	5.000	0,02
UHE	16	14.534.900	45,98
UTE	158	12.156.802	38,46
Total	474	31.609.182	100

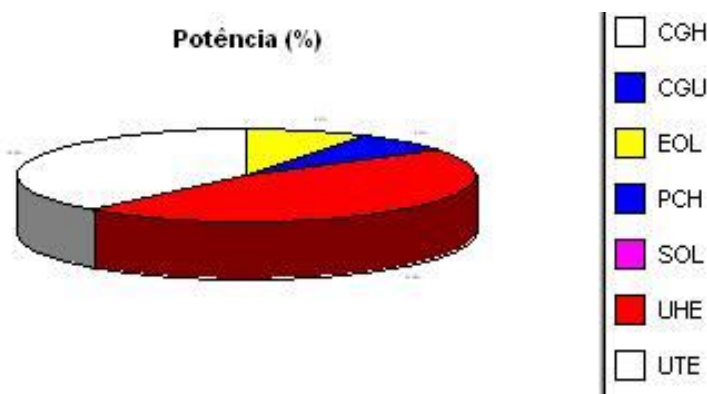


Figura 3.22 – Distribuição dos empreendimentos energéticos outorgados no Brasil.

Tabela 9 – Legenda da nomenclatura utilizada nas Tabelas 6, 7, 8 e nas Figuras 3.20, 3.21 e 3.22 (ANEEL, 2011).

Legenda	
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CGU	Central Geradora Undi-Elétrica
EOL	Central Geradora Eolielétrica
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SOL	Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE	Usina Hidrelétrica de Energia
UTE	Usina Termelétrica de Energia
UTN	Usina Termonuclear

3.2.2.1 Contribuição da Capacidade Instalada por Estado

Na Tabela 10, é apresentada a capacidade instalada de geração de energia elétrica por estado, onde as usinas de divisa são computadas em ambos os estados.

Tabela 10 – Capacidade Instalada (kW) por estado (ANEEL, 2011).

UF	Capacidade Instalada (kW)	%
GO	9.654.289,20	8,52
MA	672.124,80	0,59
CE	1.399.954	1,23
PB	409.512	0,36
PI	316.810	0,28
SP	23.763.199,16	20,96
RN	633.076	0,56
DF	42.170	0,04
PA	8.869.533,60	7,82
RS	8.187.503,60	7,22
SE	3.207.044,40	2,83
RJ	8.616.429,40	7,60

AC	135.893,10	0,12
AL	7.688.026,50	6,78
RO	905.753,48	0,80
ES	1.962.101	1,73
PR	17.794.387,20	15,70
SC	6.576.649,10	5,80
AM	2.174.805,60	1,92
BA	9.792.680,90	8,64
TO	1.809.680	1,60
MG	19.221.480,45	16,95
MS	8.036.471	7,09
RR	122.610,40	0,11
AP	297.949	0,26
PE	2.791.428,70	2,46
MT	2.237.340,82	1,97

A capacidade instalada no país inteiro é de 113.368.790,41 kW e para efeito de cálculo, as usinas localizadas em divisa são consideradas em um único Estado. Na Figura 3.23 é ilustrada a representação percentual de cada Estado de maneira gráfica.

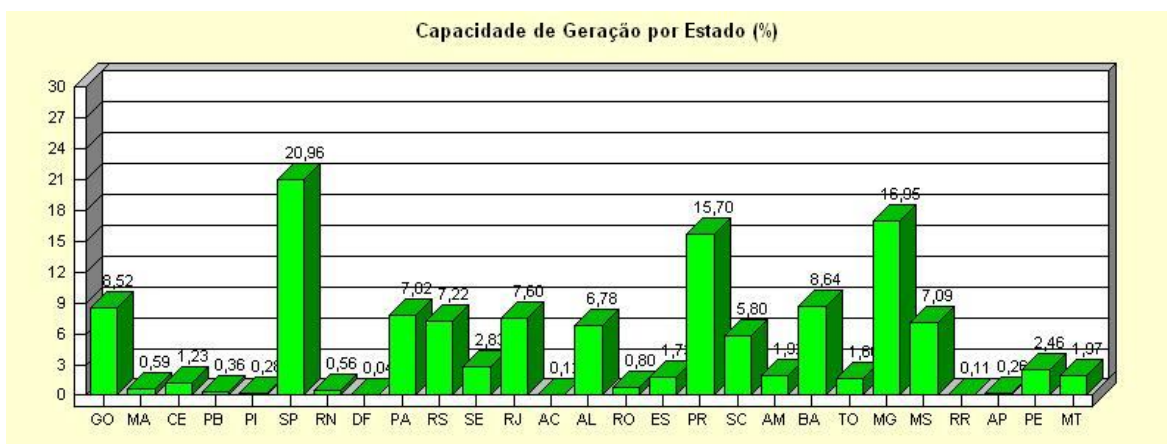


Figura 3.23 – Distribuição percentual da capacidade de geração de energia elétrica por estado (ANEEL, 2011).

3.2.2.2 Geração de Energia Eólica no Nordeste

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Através do ONS, tem-se à disposição dados de diversas naturezas, inclusive sobre o comportamento da geração de energia eólica no Nordeste nos últimos anos. Nas Figuras

3.24 e 3.25 encontram-se gráficos demonstrativos e comparativos desse crescimento eólico desde 2008. As Tabelas 11 e 12 indicam os valores de maneira mais precisa.

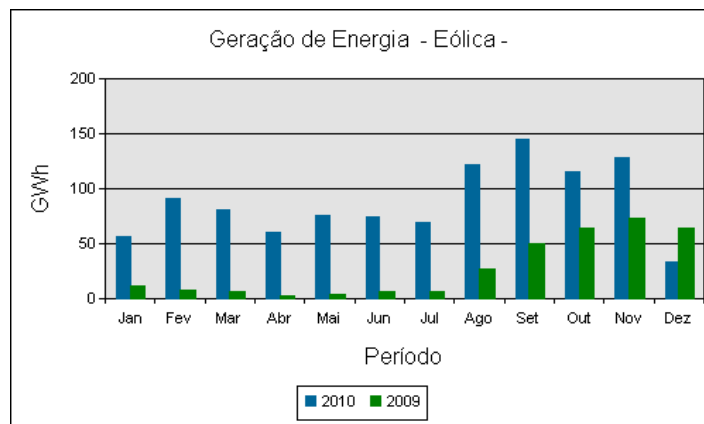


Figura 3.24 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2009 e 2010 (ONS, 2011).

Tabela 11 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2009 e 2010 (ONS, 2011).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2009	10,91	8,26	5,95	2,71	3,36	6,87	6,58	27,50	50,05	64,21	72,50	63,84
2010	56,64	91,65	80,84	60,46	75,49	74,97	69,65	121,45	144,58	115,19	128,11	33,85
%	419,16	1009,56	1258,66	2131,00	2146,73	991,27	958,51	341,64	188,87	79,40	76,70	46,98

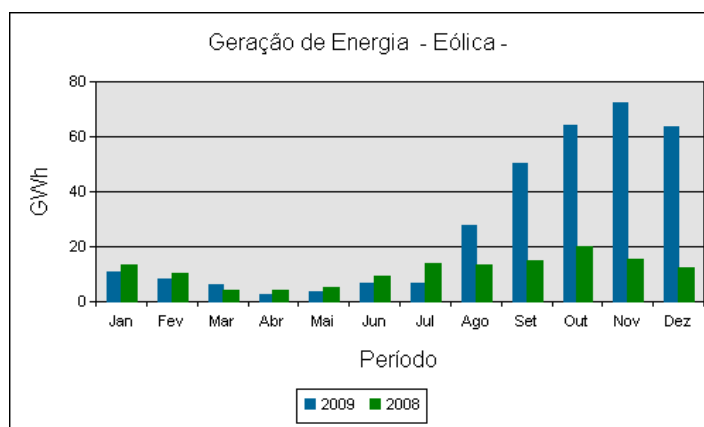


Figura 3.25 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2008 e 2009 (ONS, 2011).

Tabela 12 - Comparativo da geração de energia eólica no NE entre 2008 e 2009 (ONS, 2011).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2008	13,40	10,39	3,87	3,92	5,17	9,27	13,59	13,24	15,10	19,82	15,16	12,42
2009	10,91	8,26	5,95	2,71	3,36	6,87	6,58	27,50	50,05	64,21	72,50	63,84
%	-18,58	-20,50	53,75	-30,87	-35,01	-25,89	-51,58	107,70	231,46	223,97	378,23	414,01

3.2.3 Usinas Eólicas Instaladas no Brasil

As usinas e parques eólicos instalados no Brasil estão representados na Tabela 13, que identifica o nome do parque, a potência fiscalizada (em kW), o destino da energia, o proprietário do parque e o município no qual está instalado.

Tabela 13 – Distribuição dos parques eólicos instalados no Brasil (ANEEL, 2011).

Usina	Potência Fiscalizada (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Eólica de Prainha	10.000	PIE	100% para Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda	Aquiraz - CE
Eólica de Taiba	5.000	PIE	100% para Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólio - Elétrica de Palmas	2.500	PIE	100% para Centrais Eólicas do Paraná Ltda.	Palmas - PR
Eólica de Fernando de Noronha	225	REG	100% para Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Fernando de Noronha - PE
Parque Eólico de Beberibe	25.600	PIE	100% para Eólica Beberibe S.A.	Beberibe - CE
Mucuripe	2.400	REG	100% para Wobben Wind Power Indústria e Comércio Ltda	Fortaleza - CE
RN 15 - Rio do Fogo	49.300	PIE	100% para Energias Renováveis do Brasil S.A.	Rio do Fogo - RN
Praia do Morgado	28.800	PIE	100% para Central Eólica Praia do Morgado S/A	Acaraú - CE
Volta do Rio	42.000	PIE	100% para Central Eólica Volta do Rio S/A	Acaraú - CE
Alegria I	51.000	PIE	100% para New Energy Options Geração de Energia S/A	Guamaré - RN
Pirauá	4.950	PIE	100% para Eólica Pirauá Geradora de Energia S.A.	Macaparana - PE
Eólica de Bom Jardim	600	REG	100% para Parque Eólico de Santa Catarina Ltda	Bom Jardim da Serra - SC
Foz do Rio Choró	25.200	PIE	100% para SIIF Cinco Geração e Comercialização de Energia S.A.	Beberibe - CE
Praia Formosa	104.400	PIE	100% para Eólica Formosa Geração e Comercialização de Energia S.A.	Camocim - CE
Eólica Olinda	225	REG	100% para Centro Brasileiro de Energia Eólica - FADE/UFPE	Olinda - PE
Eólica Canoa Quebrada	10.500	PIE	100% para Rosa dos Ventos Geração e Comercialização de Energia S.A.	Aracati - CE
Lagoa do Mato	3.230	PIE	100% para Rosa dos Ventos Geração e Comercialização de Energia S.A.	Aracati - CE
Parque Eólico do Horizonte	4.800	REG	100% para Central Nacional de Energia Eólica Ltda	Água Doce - SC
Eólica Icarazinho	54.600	PIE	100% para Eólica Icarazinho Geração e Comercialização de Energia S.A.	Amontada - CE
Eólica Paracuru	23.400	PIE	100% para Eólica Paracuru Geração e Comercialização de Energia S.A.	Paracuru - CE
Eólica Praias de Parajuru	28.804	PIE	100% para Central Eólica Praia de Parajuru S/A	Beberibe - CE
Gargaú	28.050	PIE	100% para Gargaú Energética S.A.	São Francisco de Itabapoana - RJ
Pedra do Sal	18.000	PIE	100% para Eólica Pedra do Sal S.A.	Parnaíba - PI
Parque Eólico Enacel	31.500	PIE	100% para Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	Aracati - CE
Macau	1.800	REG	100% para Petróleo Brasileiro S/A	Macau - RN

Canoa Quebrada	57.000	PIE	100% para Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	Aracati - CE
Eólica Água Doce	9.000	PIE	100% para Central Nacional de Energia Eólica Ltda	Água Doce - SC
Parque Eólico de Osório	50.000	PIE	100% para Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico Sangradouro	50.000	PIE	100% para Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Parque Eólico de Palmares	8.000	PIE	100% para Parques Eólicos Palmares S.A.	Palmares do Sul - RS
Taiba Albatroz	16.500	PIE	100% para Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	São Gonçalo do Amarante - CE
Parque Eólico dos Índios	50.000	PIE	100% para Ventos do Sul Energia S/A	Osório - RS
Bons Ventos	50.000	PIE	100% para Bons Ventos Geradora de Energia S.A.	Aracati - CE
Xavante	4.950	PIE	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.	Pombos - PE
Mandacaru	4.950	PIE	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.	Gravatá - PE
Santa Maria	4.950	PIE	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.	Gravatá - PE
Gravatá Fruitrade	4.950	PIE	100% para Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.	Gravatá - PE
Millennium	10.200	PIE	100% para SPE Millennium Central Geradora Eólica S/A	Mataraca - PB
Vitória	4.500	PIE	100% para Cardus Energia Ltda.	Mataraca - PB
Presidente	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Camurim	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Albatroz	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos I	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos III	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Atlântica	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Caravela	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos II	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Coelhos IV	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
Mataraca	4.500	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A	Mataraca - PB
IMT	2,20	REG	100% para Electra Power Geração de Energia Ltda	Curitiba - PR
Total: 50 Usina(s)			Potência Total: 926.886,20 kW	

Tabela 14 – Legenda da nomenclatura utilizada para designar o destino da energia.

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

3.3 Tendências para o Futuro

Devido à crise energética e os efeitos da utilização das fontes de energia não-renováveis diretamente sobre o clima, conforme conclusão da comunidade científica, a alternativa de utilização da energia eólica é cada vez maior, nos panoramas energéticos e no cenário mundial. A Figura 3.26 mostra a potência eólica total instalada pelo mundo entre 1996 e 2008. Já a Figura 3.27, além disso, mostra também a tendência de crescimento até 2020.

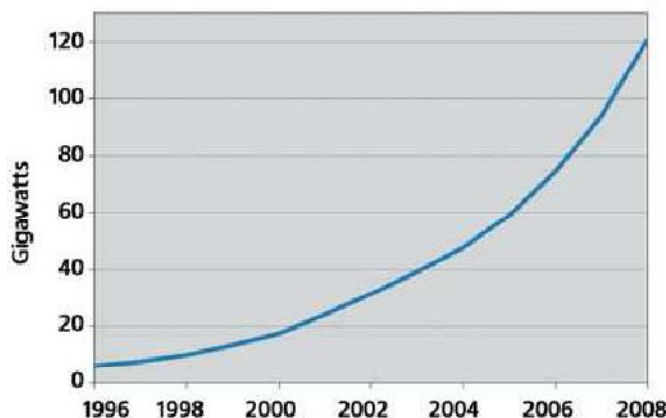


Figura 3.26 – Potência eólica instalada no mundo, entre 1996 e 2008.
Fonte: ren21.net

CAPACIDADE EÓLICA TOTAL INSTALADA E PROJEÇÃO 1997-2020 (MW).

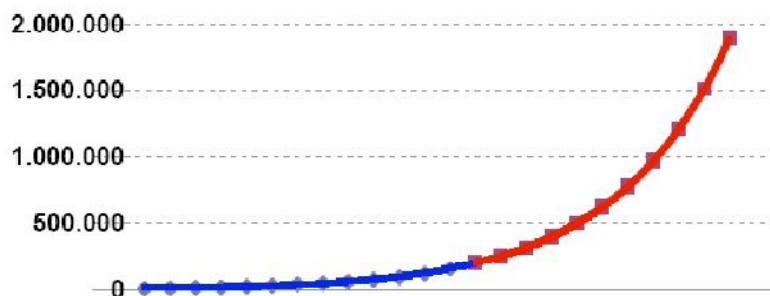


Figura 3.27 – Tendência do crescimento eólico projetada até 2020 (WWEA, 2011).

Como constatado nas Figuras 3.26 e 3.27, a geração de eletricidade através da fonte eólica tem apresentado um importante crescimento mundial, e a continuar assim essa tendência, os planos de instalações de potência eólica são muito grandes para o futuro. Estima-se que a energia eólica crescerá de 160 GW em 2009 para 1900 GW em 2020 (WWEA), representando

um aumento de 12% ao ano em todo planeta, gerando aproximadamente 1,7 milhões de empregos e reduzindo a emissão de dióxido de carbono em mais de 10 bilhões de toneladas.

3.3.1 Tamanho dos Rotores

Acompanhando essa tendência de crescimento da utilização da energia eólica, vem o aumento de tamanho dos rotores e consequente evolução dos aerogeradores. A aerodinâmica não é a única consideração de projeto na criação de uma turbina eólica eficaz. O tamanho importa bastante: 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. De modo geral, dobrar o diâmetro do rotor quadruplica a geração 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 com os objetos ao nível do solo interrompem o fluxo do vento). Estima-se um aumento de 12% na velocidade do vento cada vez que se dobra a elevação da altura.

Para se calcular a real quantidade de potência que uma turbina pode gerar a partir do vento, é necessário conhecer a velocidade do vento no local da turbina e a capacidade nominal da mesma. A maioria das turbinas grandes produz sua potência máxima com velocidades do vento ao redor de 15 m/s. Considerando velocidades do vento estáveis, é o diâmetro do rotor que determina a quantidade de energia que uma turbina pode gerar. À medida que o diâmetro de um rotor aumenta, a altura da torre também aumenta, o que significa maior acesso a ventos mais rápidos. A Tabela 15 mostra a capacidade de geração da turbina em função do diâmetro de seu rotor (valores aproximados).

Tabela 15 – Diâmetro do rotor em função da potência gerada (Associação Dinamarquesa da Indústria Eólica e Associação Americana de Energia Eólica).

Tamanho do rotor e geração máxima de potência	
Diâmetro do rotor (m)	Geração de potência (kW)
10	25
17	100
27	225
33	300
40	500
44	600
48	750
54	1000
64	1500
72	2000
80	2500

3.3.2 A Evolução Comercial de Aerogeradores de Grande Porte

O comércio de aerogeradores no mundo se desenvolveu rapidamente em tecnologia e tamanhos durante os últimos 15 anos. A Figura 3.28 mostra o impressionante desenvolvimento do tamanho e da potência de aerogeradores desde 1985.

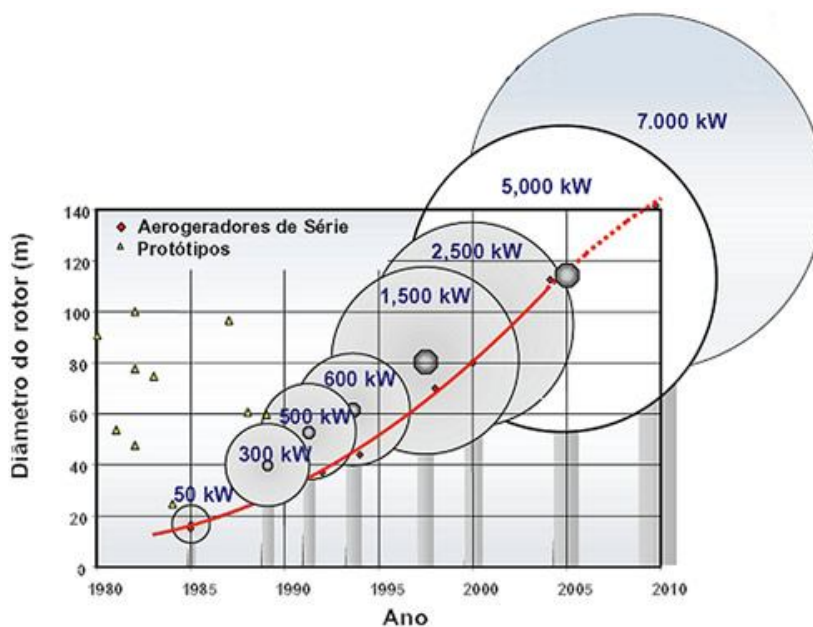


Figura 3.28 – Aumento do tamanho dos rotores de 1985 até 2005.

Fonte: DEWI.

Na Alemanha, a energia eólica é vista como indústria de alto valor agregado e de empregos especializados, o que permitiu a criação de várias pequenas empresas de fabricantes de componentes, freios, instrumentação, além de desenvolver o segmento de empresas de serviços de montagem e reparos de aerogeradores.

Desafios surgem, para os fabricantes. E, com o aumento do tamanho médio dos aerogeradores (Figura 3.28), o custo por kW instalado tem diminuído. Na Alemanha, o fabricante Enercon, desenvolveu um aerogerador em que não há caixa de transmissão, o que permitiu o acoplamento do eixo da turbina diretamente ao eixo do gerador elétrico.

São necessários mais incentivos para pesquisa, não apenas para o desenvolvimento de um equipamento nacional, mas também para a questão do potencial eólico e previsão de ventos. Ainda não se dispõe de dados do vento de longo prazo (mais de 10 anos), fundamental para se determinar o potencial eólico confiável em uma localidade.

Em decorrência do grande potencial eólico brasileiro, tendo-se em vista a localização dos possíveis parques de produção dessa energia, e observando o cenário atual, é possível e desejável o desenvolvimento de um modelo similar ao existente na Alemanha. Somente será possível esse modelo, no caso de o Brasil optar por desenvolver tecnologias de energias renováveis para as indústrias.

3.4 Custo

O custo de produção de energia continua a representar um desafio significativo para o crescimento da energia eólica. Os valores para a instalação dos parques, no mercado mundial, estão entre US\$ 1000 a US\$ 1400, o kW de potência instalada. Esses valores podem ser alterados em função de:

- Tamanho;
- Capacidade;
- Distância;
- Topografia – linhas de transmissão;
- Terreno - custo e características;
- Transporte;
- Montagem;
- Mão-de-obra;
- Incentivos fiscais.

Existe também o custo de geração, que varia em função da velocidade média dos ventos. A remuneração praticada no mercado internacional varia entre US\$ 35/MWh (ventos maiores que 10m/s) e US\$ 110/MWh (ventos menores que 5,5m/s), dependendo dos incentivos de cada país. Na Alemanha e na Espanha, com ventos médios anuais nas faixas de 5,5 a 7,0 m/s, paga-se US\$ 93/MWh (Alemanha) e US\$ 110/MWh (Espanha).

Segundo o diretor-presidente da fabricante indiana de equipamentos eólicos Suzlon, o custo de produção é de US\$ 0,05 a US\$ 0,06/kWh. Mas os custos são altamente dependentes dos juros de financiamento do projeto. Já o custo de instalação é da ordem de US\$ 1 milhão por MW nas melhores condições.

O primeiro leilão brasileiro para contratação de energia elétrica gerada por fonte eólica ocorreu em dezembro de 2009. Foram negociados 753 lotes de 1 MW ao preço médio de R\$ 148,39 MWh. Esse valor representa um deságio de 21,49% em relação ao preço-teto definido em edital no valor de R\$ 189/MWh. A maioria dos empreendimentos vencedores será instalada em Sergipe, Ceará, Rio Grande do Norte, Bahia e Rio Grande do Sul.

Para efeito de comparação, o leilão da energia gerada por biomassa teve duas usinas que venderam energia ao preço médio de R\$ 145,37/MWh com deságio de 6,81% em relação ao preço-teto definido em R\$ 156/MWh. Para o caso de uma comparação com energia hidroelétrica, o teto definido na licitação para as usinas do complexo hidroelétrico do Rio Madeira foi de R\$ 91 (UHE Jirau), em 2008, e R\$ 122 (UHE Santo Antônio) em 2007. Esses preços de hidroeletricidade foram reduzidos em até 35% nos leilões realizados em 2008 e 2007 para as respectivas licitações. O fornecimento de energia foi negociado a R\$ 71,4/MWh no caso de Jirau e R\$ 78,9/MWh para a usina de Santo Antônio.

O segundo leilão brasileiro para contratação de energia elétrica gerada por fonte eólica ocorreu em agosto de 2010. O leilão realizado pela Aneel foi dividido em dois: um de energia de reserva (para garantir a segurança do sistema) e outro de energia alternativa. Em dois dias de negociações, a Aneel vendeu 2.892,2 MW de energia elétrica entre 89 usinas de fontes renováveis, sendo 70% desse montante referente a usinas eólicas. O preço médio da energia negociada ficou na casa de R\$ 133,56/MWh e o deságio médio total dos leilões foi de 18,6%.

Na disputa desse leilão, 70 usinas eólicas negociaram energia com preço médio de R\$ 130,86/MWh. Com o resultado, o parque eólico brasileiro, que já havia triplicado no leilão anterior, atingirá mais de 4 GW de capacidade instalada.

4 CAPÍTULO 4 - O ESTADO DA ARTE

Além das primeiras utilizações da energia eólica com moinhos de vento para bombeamento de água e moagem de grãos, movimentação dos navios e embarcações de antigamente e, mais recentemente com a descoberta da eletricidade, a utilização do ar como “combustível” à geração de energia elétrica pelas turbinas eólicas, existem diversas outras aplicações a partir dos ventos.

O estado da arte é o nível mais alto de desenvolvimento, seja de um aparelho, de uma técnica ou de uma área científica, alcançado em um determinado tempo. O estado da arte indica, portanto, o ponto em que o produto em questão deixa de ser um projeto técnico para se tornar uma obra-prima.

O trabalho aqui relatado também tem como objetivo mostrar a aplicabilidade, diversificação e modelos inovadores de sustentabilidade da energia eólica. Os exemplos a seguir mostram essas características.

4.1 Edifícios Auto-Suficientes em Energia

Nos parques de diversões da arquitetura contemporânea, a corrida tecnológica flerta agora o discurso ecológico e sustentável. E os fortes ventos trocados entre o Golfo Pérsico e o deserto levaram a uma escolha óbvia em países da Península Arábica: turbinas eólicas incorporadas na edificação. No caso de arranha-céus, pode haver um grande potencial de aproveitamento. Trata-se de edifícios com mais de 100 m de altura, onde a velocidade do vento no topo tende a ser bem maior do que no solo.

Desde abril de 2008 três turbinas unidirecionais de 29 m de diâmetro giram entre as duas torres gêmeas de 240 m de altura e em forma de vela do Bahrain World Trade Center (BWTC), criado pelo escritório britânico Atkins. O objetivo era que a brisa do Golfo Pérsico suprisse até 15% da energia consumida pelo prédio. Isso representaria 1,3 GWh por ano, suficientes para deixar de emitir 55 toneladas de carbono anuais.

Segundo a Atkins, o custo de até 30% do valor do projeto tornaria inviável a integração de turbinas de larga escala, tanto por conta da adaptação do projeto do prédio quanto das pesquisas de turbinas especiais. A solução foi usar turbinas convencionais sustentadas cada uma

por um eixo horizontal de 50 toneladas. No entanto, o potencial da região aliado à criatividade da empresa fez com que sua incorporação custasse menos de 3% do projeto.

A solução não foi a ideal, melhor para esse projeto seria que tivessem eixo vertical. As turbinas eólicas de eixo vertical têm a vantagem da facilidade de manutenção e normalmente funcionam com o vento vindo de todas as direções, sem a necessidade de possuírem mecanismos como leme para colocarem as pás na direção dos ventos.

Para resolver o fato de a turbina ser fixa, a Atkins projetou para as torres um perfil elíptico que afunila o vento. Testes em túnel de vento mostraram que o desenho não apenas forma pressão negativa na parte de trás do prédio, o que acelera o vento entre as torres em até 30%, como também o desvia num percurso em formato de "S" cujo centro permanece quase perpendicular à turbina dentro de um azimute de 45°. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustram essas torres de Bahrain.



Figura 4.1 – Foto frontal do BWTC.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com



Figura 4.2 – Vista vertical dos 3 aerogeradores do BWTC.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com



Figura 4.3 – Imagem do aerogerador acoplado à estrutura horizontal.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com

Em outro projeto de Dubai, a ideia é gerar energia elétrica bem além do que o edifício consome. O arranha-céu de 50 andares será equipado com três sistemas de captação de energia que, ao todo, produzem 10 MW. Pela Figura 4.4 se tem uma ideia desse projeto.

O primeiro é uma turbina eólica de 5 MW localizada no topo do edifício. Em seguida, há a cobertura de espelhos especiais capazes de concentrar a luz do Sol num único ponto, gerando outros 3 MW. O restante vem de um sistema que capta o movimento do ar quente ascendente nas paredes externas e o transforma em energia.

Segundo a Studied Impact, que fez o projeto, esse valor gerado é dez vezes o consumo do edifício, o que significa que o prédio ainda poderia fornecer energia aos vizinhos. Baseado em previsões meteorológicas, os projetistas acreditam que a torre poderá operar 2.400 horas por ano, num total de 20 GWh liberados em 365 dias.



Figura 4.4 – Imagem ilustrativa de projeto sustentável em energia.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com

4.2 Modelo com Hastes Flexíveis

O projeto “Windstalk” ficou em segundo lugar na competição "Land Art Generator" (2010), que foi criada pela cidade planejada de Masdar (ainda em construção, seguindo os princípios da sustentabilidade, dentro de Abu Dhabi - capital dos Emirados Árabes Unidos). Esta competição tem por objetivo premiar o projeto que ofereça a mais limpa, criativa e funcional utilização de energia alternativa.

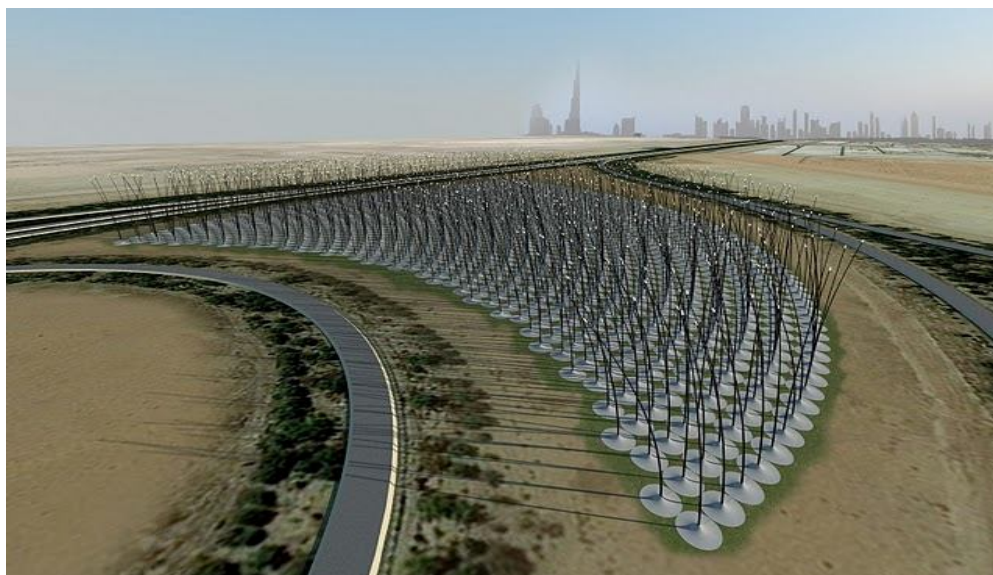


Figura 4.5 - Parque piezoeólico na cidade planejada de Masdar, próximo a Abu Dhabi.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com

A proposta do projeto solicita 1203 hastes, cada um com 55 metros de altura, com bases de concreto que estão entre 10 e 20 metros de largura (Figura 4.5). As hastes de fibra de carbono, reforçadas com resina, são cerca de 30 centímetros de largura na base afinando para cerca de 5 centímetros na parte superior. Cada haste conterá camadas alternadas de eletrodos e discos de cerâmica feitas de material piezoelétrico, que gera uma corrente elétrica quando colocada sob pressão mecânica. No caso dos pés, os discos irão comprimir conforme eles balançam ao vento, criando uma carga. A ideia surgiu da tentativa de encontrar modelos cinéticos na natureza que possam ser aproveitados para produzir energia.

Cada base é ligeiramente diferente, e está inclinada de modo que a chuva será canalizada para as zonas entre o concreto para ajudar as plantas a crescerem livremente. Estas bases formam uma espécie de espaço de parque público e servem a um propósito tecnológico. Cada um contém

um gerador de torque, que converte a energia cinética da haste em energia elétrica utilizando cilindros amortecedores.

Como o vento não é constante, duas grandes câmaras abaixo de toda a área funcionarão como uma bateria para armazenar energia. A ideia é baseada em sistemas de armazenamento bombeado em hidrelétricas já existentes. A água na câmara superior fluirá através de turbinas para a câmara inferior, liberando a energia armazenada até que o vento comece a soprar novamente. Esses detalhes podem ser observados na Figura 4.6.

O topo de cada haste contém uma luz LED que acende quando o vento está soprando. A luz acende de maneira mais intensa durante os ventos fortes e apaga ou fica menos intensa quando o ar está fraco. As hastes deverão se comportar naturalmente, vibrando e flutuando no ar.

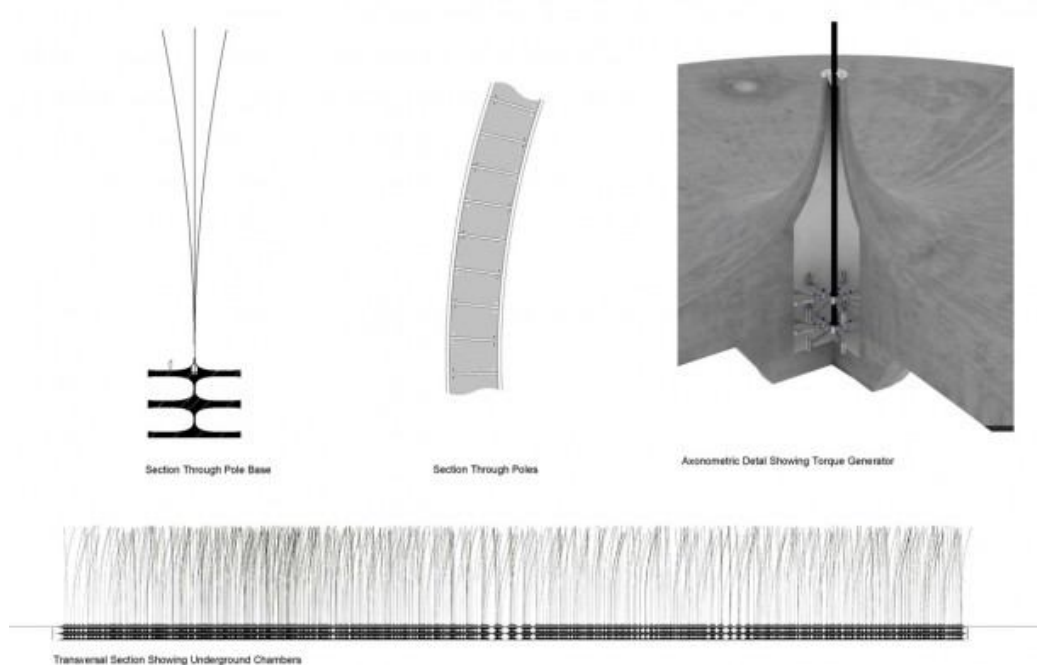


Figura 4.6 - Hastes flexíveis de fibra de carbono e base de cerâmica feita com material piezoelétrico.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com

Após a conclusão, uma Windstalk deve ser capaz de gerar eletricidade de maneira comparável a um parque eólico convencional cobrindo a mesma área. Entretanto com a vantagem de que a produção poderia ser aumentada com uma matriz mais densa de hastes. Densidade não é possível com turbinas convencionais, que devem ser espaçadas em cerca de três vezes o diâmetro do rotor, para evitar a turbulência do ar. Mas Windstalks trabalham sobre o caos e turbulência de modo que podem ser instalados muito mais próximos.

4.3 Poste de Iluminação Pública Alimentado por Energia Eólica e Solar

Foi desenvolvido no Ceará, pela empresa Gram-Eollic, o primeiro poste de iluminação pública totalmente alimentado por energia eólica e solar. O que mais chama a atenção no poste produtor independente de energia, que possui modelos de aço de 12 e 18 metros de altura, é a presença de um pequeno avião no topo.

O avião de três metros de comprimento, feito em fibra de carbono e alumínio especial, na realidade é a peça-chave do poste híbrido. A escolha do formato de avião se deve à sua aerodinâmica, facilitando a captura de raios solares e de vento. São duas fontes de energia alimentando o poste ao mesmo tempo, podendo ser instalado em qualquer localidade.

As asas do avião abrigam células solares que captam raios ultravioletas e infravermelhos por meio do silício, transformando-os em energia elétrica (até 400 W), que é armazenada em uma bateria fixada alguns metros abaixo. Cumprindo a mesma tarefa de gerar energia, estão as hélices do avião. Assim como as pás dos grandes aerogeradores, a energia (até 1.000 W) é gerada a partir do giro dessas hélices. A estrutura desses postes pode ser observada nas Figuras 4.7 e 4.8.

Cada poste com um "avião" (na verdade, um gerador) é capaz de gerar energia para outros dois sem gerador e com seis lâmpadas LEDs (cerca de 50 vezes mais duradouras e com luminosidade 8 vezes maior que as lâmpadas convencionais). A captação da luz e do vento pelo avião é feita em um eixo com giro de 360 graus, de acordo com a direção do vento. Por meio dessas duas fontes, funcionando paralelamente, a bateria do poste híbrido tem autonomia de até sete dias (em torno de 70 horas), ou seja, é à prova de "apagão".

O projeto, gestado durante sete anos, pode ser visto no Palácio Iracema - Ceará, onde passa por testes. A intenção é colocar o poste híbrido em praças, avenidas e rodovias. Há benefícios econômicos para o (possível) investidor. A Gram-Eollic afirma que a economia é de cerca de R\$ 21.000 por quilômetro/mês, considerando-se a fatura cheia da energia elétrica. Além disso, o custo de instalação de cada poste é cerca de 10% menor que o convencional, isso porque economiza transmissão, subestação e cabeamento. A alternativa teria, também, um forte impacto no consumo da iluminação pública, que atualmente representa 7% da energia no estado. Com os

novos postes, esse consumo passaria para próximo de 3%, e além das vantagens econômicas existe ainda o apelo ambiental.



Figura 4.7 - Utilização do poste autônomo em avenida.
Fonte: robotizados.blogspot.com



Figura 4.8 - Partes componentes do poste híbrido.
Fonte: robotizados.blogspot.com

4.4 Gerador de Energia Eólica Portátil

Windbelt é uma tecnologia que foi criada e pretende revolucionar o conceito de energia eólica. Em vez de utilizar grandes e complexas turbinas, usa um pequeno mecanismo feito a partir de uma membrana vibratória, ímãs e uma bobina de metal. O micro gerador eólico (Figura 4.9) pode recarregar baterias e pequenos dispositivos eletrônicos.



Figura 4.9 - Micro gerador eólico (Windbelt).
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com

A geração de energia acontece a partir do fenômeno de flutter aeroelástico, ou apenas “flutter” (Figura 4.10): o gerador usa a oscilação de uma tira fina de material tensionado, preso entre duas molas, para vibrar um ímã que gera energia elétrica.

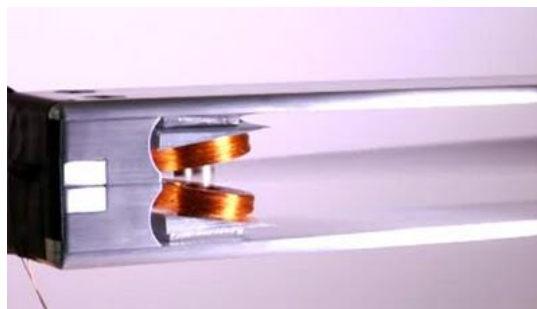


Figura 4.10 - Fenômeno “flutter” no ímã do windbelt.
Fonte: a-casa-ecologica.blogspot.com

O protótipo se apresenta em dois modelos: um com cinco centímetros de comprimento e um centímetro de altura (capaz de gerar energia para pequenos aparelhos eletrônicos) e outro com um metro de comprimento capaz de gerar de três a cinco watts. Estes equipamentos ainda podem ser utilizados de forma agrupada. Um único painel de um metro quadrado formado por algumas unidades de Windbelt poderá produzir até 100 W com um custo de cerca de US\$ 1/W.

5 CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO

Essa parte do trabalho trata do objetivo específico, aponta as perspectivas para o Nordeste e mostra o início do mapeamento eólico da Paraíba.

5.1 Caso Mataraca

Um dos propósitos desse trabalho é apresentar a estrutura dos parques eólicos de Mataraca, região do litoral norte da Paraíba. São três empreendimentos e ambos estão implantados na praia Barra de Camaratuba (PB), divisa com Baía Formosa (RN): Millennium, Vale dos Ventos e Vitória (em ordem cronológica de funcionamento) totalizando quase 60 MW de potência nominal instalada.

A fazenda eólica Millennium (Figura 5.1) foi o primeiro parque de geração de energia eólica da Paraíba. O empreendimento, que teve suas instalações concluídas em outubro de 2007 e que está em funcionamento comercial desde abril de 2008, é o primeiro do gênero no Brasil instalado pela empresa australiana Pacific Hydro que investiu R\$ 49,2 milhões através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica do governo federal. O Banco do Nordeste do Brasil (BNB) financiou cerca de 70% desse montante. Para garantir um mínimo de impacto ambiental, o projeto também opera sob um sistema de gerenciamento ambiental certificado pelo padrão internacional ISO 14001. A potência fiscalizada de 10,2 MW gerada pelos treze aerogeradores complementa a demanda na região de Mataraca e tem capacidade para atender 10 mil residências e evitar a emissão de 30 mil toneladas/ano de gases poluentes. Em termos literais, a potência gerada anual é de 32 GWh. A usina eólica fica localizada na área da mineradora Millennium, que consome boa parte dessa energia gerada.



Figura 5.1 - Parque Millennium.

A segunda usina de energia eólica é a Vale dos Ventos (Figuras 5.2 e 5.3), também pertencente à empresa australiana Pacific Hydro, tem sessenta aerogeradores com capacidade

nominal de 48 MW e custou para a empresa mais de R\$ 250 milhões. O parque eólico está em funcionamento comercial desde fevereiro de 2009. Os 60 aerogeradores foram divididos em grupos de seis unidades originando os nomes das 10 centrais do parque Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.: Atlântica, Caravela, Presidente, Camurim, Albatroz, Coelhos I, Coelhos II, Coelhos III, Coelhos IV e Mataraca. Cada aerogerador opera com potência nominal de 800 kW, no entanto a potência fiscalizada pela Aneel é de 750 kW por turbina eólica. Então, a potência outorgada pela Aneel é de 48 MW e a potência fiscalizada é de 45 MW. A velocidade dos ventos do litoral de Mataraca, matéria-prima importante na consolidação do projeto, incentivos fiscais do governo do Estado, acesso a uma área ideal para a construção do parque e agilidade de licenças dos órgãos ambientais como Sudema e Ibama, foram as principais razões para que a empresa Pacific Hydro escolhesse a Paraíba para implementar parques eólicos no Brasil.

A energia gerada é adquirida pela Eletrobrás, que redistribui com municípios através de convênios com a Energisa. Os aerogeradores têm vida útil de 50 anos e com 25 anos de uso serão submetidos a uma reavaliação e manutenção geral. As torres de concreto, instaladas a 200 metros de distância uma da outra, têm 80 metros de altura e hélice de fibra e metal com 48 metros de diâmetro e base com 20×30 metros. Os dois parques juntos têm a capacidade de fornecer energia para aproximadamente 60 mil residências.



Figura 5.2 - Parque Vale dos Ventos.



Figura 5.3 - Placa de identificação do parque Vale dos Ventos.

A terceira usina é a Vitória (Figuras 5.4 e 5.5) com 3 aerogeradores de 1,5 MW cada, totalizando uma potência nominal de 4,5 MW. Esse parque teve seu início de funcionamento comercial em novembro de 2010 e pertence ao grupo Cardus Energia. De maneira semelhante aos outros dois parques da Pacific Hydro, a energia é adquirida pela Eletrobrás e distribuída ao consumidor final através da Energisa.



Figura 5.4 - Parque Vitória.



Figura 5.5 - Placa de identificação do parque Vitória.

5.1.1 Usinas e Centrais Geradoras da Paraíba

Os parques eólicos da Paraíba, incluindo potência outorgada, energia assegurada média, destino da energia e proprietário estão representados na Tabela 16:

Tabela 16 – Usinas e centrais geradoras eólicas da Paraíba.

Garantia Física / Energia Assegurada (Fonte MME)						
Usina	Classificação	Potência Outorgada (kW)	Energia Assegurada (MW médios)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Millennium	EOL	10.200	3,95	PIE	100% Para SPE Millennium Central Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Vitória	EOL	4.500	1,35	PIE	100% para Cardus Energia Ltda.	Mataraca-PB
Presidente	EOL	4800	1,34	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Camurim	EOL	4800	1,29	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Albatroz	EOL	4800	1,43	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Coelhos I	EOL	4800	1,38	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Coelhos II	EOL	4800	1,32	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Coelhos III	EOL	4800	1,31	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Coelhos IV	EOL	4800	1,31	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Atlântica	EOL	4800	1,21	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Caravela	EOL	4800	1,47	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB
Mataraca	EOL	4800	1,27	PIE	100% para Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.	Mataraca-PB

Fonte: Aneel (2011).

PIE – Produção Independente de Energia.

5.1.2 Modelo Utilizado nos Parques Millennium e Vale dos Ventos

O modelo dos parques da Pacific Hydro é o gerador Wobben Enercon E-48. A família de aerogeradores E-48 (Figura 5.6), com 48 metros de diâmetro do rotor, é aquela de turbinas eólicas de médio porte de maior venda no mundo, com cerca de 6.500 unidades instaladas em 35 países.

Geram 800 kW de potência nominal e trabalham com 400 V entre fases. Esse modelo foi o escolhido para representar todos os 73 aerogeradores dos parques Millennium e Vale dos

Ventos. Em potência nominal, o que ocorre geralmente entre os meses de agosto e outubro, o gerador opera com uma corrente máxima de referência de 1500 A por fase.



Figura 5.6 – Modelo E-48 da Wobben Enercon.

Possui rotor com controle ativo de ângulo de passo das pás de frente para o vento (upwind), sentido de rotação horário, pás de material epóxi (reforçado com fibra de vidro) com proteção total contra descargas atmosféricas, velocidade do rotor variável (16 a 32 rpm) e controle de potência com 3 sistemas elétricos de acionamento sincronizado do ângulo de passo das pás, com suprimento reserva de energia para emergências.

Também possui gerador com eixo rígido, mancais com rolamento cilíndrico, gerador de anel ENERCON com acionamento direto do rotor/gerador, alimentação da rede elétrica através do conversor ENERCON, frenagem com 3 sistemas independentes de controle do ângulo de passo das pás, freio de rotor, trava de rotor para serviço e manutenção, controle de orientação ativo por engrenagens e amortecimento dependente do esforço e sistema de monitoramento remoto ENERCON SCADA.

A velocidade do vento para início de geração de energia é de 3m/s, a velocidade do vento em potência nominal é de 13 m/s e a velocidade do vento para corte de produção é de 28 a 34 m/s.

5.1.3 Modelo Utilizado no Parque Vitória

O modelo dos 3 aerogeradores do parque Vitória é o Impsa V77 (Figura 5.7) com potência nominal de 1,5 MW e tensão de 690 V entre fases. Possui funções de monitoramento e controle microprocessados por CLP, três sistemas independentes de controle de passo para frenagem aerodinâmica, freio mecânico hidráulico para a parada do rotor e função “rotor lock” para travamento manual do rotor. Além disso, possui ponte retificadora hexafásica através de diodos e inversor trifásico comutado por IGBTs para fazer a conversão do sinal. Também possui filtro de potência com distorção harmônica total menor que 5%, fator de potência variável e disjuntores de proteção. Uma imagem da casa de controle e comando pode ser observada na Figura 5.8.



Figura 5.7 - Modelo do aerogerador V77 da Impsa Wind.



Figura 5.8 - Casa de controle e comando do parque Vitória.

5.1.4 Comparativo entre os Modelos

Nos meses de janeiro à março, por conta da baixa intensidade dos ventos, o gerador Wobben opera com uma potência de 200 kW reduzindo sua capacidade nominal em 75%.

Nas mesmas condições de vento fraco, o gerador da Impsa Wind trabalha com 30% da sua potência nominal. Ou seja, uma pequena vantagem percentual em relação ao modelo da Wobben.

Vale salientar que essas potências de operação foram fornecidas pelos técnicos responsáveis de ambas as empresas, não servindo de prova concreta para afirmar que um modelo de aerogerador é melhor ou pior que o outro. No entanto, com base em dados da Aneel, o modelo da Impsa Wind garante fornecimento mínimo de 30% da potência nominal. Já o modelo da Wobben varia de 26,89% da central Atlântica até 32,67% da central Caravela no parque Vale dos Ventos e no caso do parque Millennium o fornecimento mínimo garantido é de 38,72%.

Portanto, o mesmo modelo de aerogerador tem diferentes rendimentos de acordo com a localização em que foi instalado. Por mais relativamente próximos que estejam esses aerogeradores em Mataraca, sempre existe uma diferença na amplitude dos ventos para cada um deles, e conseqüência disso é a variação do rendimento do respectivo modelo.

5.1.5 Análise Diária dos Ventos

Ambos os parques têm altas torres com biruta, anemômetros e outros equipamentos para se fazer um estudo e monitoramento diário dos ventos. Acoplado ao anemômetro existe um sistema de transmissão dos dados armazenados para uma central de processamento. As Figuras 5.9, 5.10 e 5.11 ilustram alguns desses equipamentos. Esses dados são enviados para a Aneel e para o Operador Nacional do Sistema Elétrico.



Figura 5.9 - Antena de transmissão de dados via satélite do parque Vitória.



Figura 5.10 - Torre para coleta de dados dos ventos do parque Vitória.



Figura 5.11 - Torre para coleta de dados eólicos do parque Vale dos Ventos.

5.1.6 Integração à Linha de Transmissão

No parque Millenium existe uma subestação elevadora de 13,8 kV - 69 kV e 10 MVA com um transformador, e no parque Vale dos Ventos outra subestação elevadora de 13,8 kV - 69 kV e 83 MVA com dois transformadores de 41,5 MVA cada (Figura 5.12). Cada turbina desses dois parques tem um trafo que eleva a tensão de 400 V entre fases para 13,8 kV e conecta cada aerogerador à sua respectiva subestação. Da subestação de cada parque ocorre uma interligação com a linha de transmissão de 69 kV que vai até a subestação da Energisa, ponto de partida para a distribuição ao consumidor final. No caso do parque Vitória, cada aerogerador possui um trafo elevador, que sobe a tensão de 690 V entre fases para os 13,8 kV de outra linha de transmissão da Energisa. No Anexo C é exibido o diagrama unifilar com a inserção dos parques Millennium e Vale dos Ventos ao sistema elétrico (parte do regional derivado da subestação Mussuré II).



Figura 5.12 - Subestação do parque Vale dos Ventos.

5.2 Perspectivas dos Parques Eólicos da Região Nordeste

Depois de consolidar os investimentos da usina eólica Millennium no município de Mataraca, integrando o Projeto Vale dos Ventos, a Pacific Hydro no Brasil prepara a ampliação dessa unidade geradora de energia para começar as obras nos primeiros meses de 2011, com investimentos de R\$ 100 milhões e capacidade de atender a mais de 80 mil residências por ano. O planejamento de expansão do parque Vale dos Ventos contempla a Paraíba em mais 20 MW, totalizando cerca de 80 MW.

A empresa de energia eólica Suzlon, em parceria com o grupo espanhol Impel, implantou a primeira turbina do parque eólico que a empresa vai instalar no município de Alhandra, na Paraíba. O contrato de R\$ 22 milhões é para a construção e instalação de três turbinas.

Nessa primeira etapa, o projeto contempla a instalação de 3 aerogeradores com capacidade de geração de 2,1 MW cada, totalizando 6,3 MW. A segunda fase de implantação do parque eólico de Alhandra prevê a instalação de mais dez aerogeradores, totalizando 27 MW. O parque, que tem financiamento do BNB com prazo de 20 anos, vai incrementar a capacidade de geração de energia eólica da Paraíba em mais de 50% quando estiver em plena operação.

Até mesmo em se tratando de outros estados, as perspectivas são boas. A Contour Global Brasil, empresa geradora de energia renovável, fechou um contrato em novembro de 2010 de mais de R\$ 400 milhões para aquisição de aerogeradores que serão implantados em cinco parques eólicos no estado do Rio Grande do Norte.

No contrato assinado com a multinacional norte-americana General Electric (GE), estão previstos serviços de fornecimento, transporte, montagem e comissionamento de 100 aerogeradores da série 1,5 MW, que tem mais de 14.000 máquinas em operação no mundo. Cada um dos cinco parques (Asa Branca IV, V, VI, VII, e VIII) terá capacidade instalada de 30 MW, totalizando 150 MW.

A empresa portuguesa Martifer Renováveis Geração de Energia contratou a divisão brasileira da empresa indiana Suzlon Energy para implementar e operar todo o projeto de 218 MW (arrematado em leilão da Aneel) de geração de energia eólica que será distribuído entre o Ceará e o Rio Grande do Norte.

Serão cinco usinas, duas no Rio Grande do Norte e três no Ceará. As 104 torres que fixarão os aerogeradores terão entre 80 e 100 metros de altura, com potência de 2,1 MW cada.

5.3 Atlas Eólico da Paraíba

O Estado da Paraíba terá seu levantamento do potencial eólico ou atlas eólico. As pesquisas do projeto têm investimentos no valor de R\$ 2,7 milhões e prazo de entrega de três anos, numa parceria entre o governo do Estado, a Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco (CHESF), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e a Associação Técnico-Científica Ernesto Luiz de Oliveira Junior (ATECEL). Do total desses recursos, mais de 90% são da Eletrobrás que tem sido parceira de governos estaduais e municipais comprometidos com o desenvolvimento sustentável. Esse mapeamento eólico da Paraíba vai permitir a atração de mais investimentos privados.

O atlas eólico é um importante instrumento para se identificar as regiões com melhores ventos e determinar em que áreas do Estado existem viabilidades para se instalar uma usina de geração de energia eólica. A elaboração desse atlas é o passo inicial para que o governo possa planejar não só as redes de interligação, subestações, como também preparar todo seu pacote de incentivos para atrair investimentos nessa área.

O levantamento do potencial eólico consiste na instalação de torres de medição, dotadas de equipamentos capazes de monitorar diariamente a amplitude e direção do vento, temperatura e outras variáveis meteorológicas. Feito isso, estes dados serão armazenados e utilizados para atualizar modelos de previsão de ventos que permitirão estimar as condições de vento nas áreas não monitoradas do Estado da Paraíba.

Nos objetivos desse convênio firmado com a Eletrobrás constam o desenvolvimento de ferramentas de monitoração destinadas a empreendimentos eólicos através de dispositivos móveis; desenvolvimento de ferramentas que permitam prever a capacidade de geração de um parque eólico; análise do impacto da inserção de aerogeradores no sistema elétrico da Paraíba; desenvolvimento de tecnologias dedicadas ao controle e conexão de aerogeradores ao sistema elétrico, além da elaboração do atlas eólico da Paraíba em si.

A implantação das últimas usinas eólicas nos Estados se deu através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. O Proinfa define a implantação dessas empresas nos estados pelos estudos feitos através do atlas eólico brasileiro, que já está ultrapassado. Por conta da desatualização dos dados de ventos desse atlas, surgiu a necessidade de que cada estado tenha o seu levantamento de potencial eólico.

6 CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

A proposta aqui apresentada é a de incentivar a expansão do setor eólico em regiões onde, de fato, se tenha um bom potencial não aproveitado ou otimizado. Tanto a nível nacional quanto internacional, entretanto com destaque para o potencial de 75 GW do nordeste brasileiro. Toda forma de energia limpa é bem vinda, mas cada tipo tem sua melhor adequação em uma determinada região. Além disso, a energia oriunda dos ventos tem boa projeção no futuro e é complementar à energia hidroelétrica que atualmente predomina no país. Hoje a participação eólica na matriz energética nacional é de apenas 0,82%.

Boa parte da demanda energética pode ser suprida pela geração de energia dos aerogeradores. Pequenas centrais eólicas poderiam atender as carências de locais mais afastados da rede de distribuição garantindo a ampliação dos limites de atendimento. Já as grandes centrais, com grandes potências, contribuiriam para o aprimoramento do Sistema Interligado Nacional, ao mesmo tempo em que preservariam a já bastante afetada atmosfera terrestre sem a emissão de gases CO₂, reduziriam a necessidade de grandes reservatórios de água e preveniriam relativamente contra o risco de longas secas.

O mundo clama por medidas capazes de promover o crescimento, mas sem agressões à natureza. É o que se convencionou chamar de desenvolvimento sustentável. A energia é essencial para o progresso econômico e social e, para se ter uma melhor qualidade de vida, deve haver a introdução de novas fontes renováveis de energia no processo produtivo.

Quando começou a formação da matriz energética no Brasil, optou-se pela construção de usinas hidrelétricas. Apesar de seus impactos ambientais, temos hoje uma produção de energia razoavelmente limpa, não obstante os desafios da sua manutenção. Sem dúvidas, nosso país é um paraíso para as energias renováveis. Possui um potencial hidrelétrico imenso, sol o ano inteiro, ótima quantidade dos ventos, um litoral gigante que pode prover energias renováveis a partir de eólicas offshore, marés e ondas.

O Brasil tem índices tímidos no que concerne ao aproveitamento da energia eólica, apesar dos ventos e terrenos em abundância. Os principais obstáculos para o seu desenvolvimento estão nos impostos que incidem sobre os equipamentos e nos custos operacionais, a onerarem os

projetos de exploração. Estimam-se investimentos na ordem de R\$ 45 milhões, para a construção de um parque eólico com potência de 10 MW.

No atual modelo brasileiro, quando as hidrelétricas não suprem a demanda, usinas termelétricas já contratadas são utilizadas para a complementação da energia elétrica necessária. A utilização da energia eólica, se aproveitada, preservaria os recursos hídricos, já que os ventos sopram mais intensamente quando o regime de chuvas é menor e os reservatórios estão vazios.

Bibliografia

- CARVALHO, PAULO. **Geração Eólica**. Imprensa Universitária, Fortaleza – CE, 2003.
- LOPEZ, RICARDO ALDABÓ. **Energia Eólica**. Editora Artliber, São Paulo – SP, 2002.
- AMARANTE, O.A.C.;SCHULTZ, D. J. **Wind energy of the state of Paraná**, Brazil. DEWI Magazin No. 15, August 1999.
- CAMARGO, A.S.G. **Análise da operação das usinas eólicas de Camelinho e Palmas e avaliação do potencial eólico de localidades no Paraná**. Tese de Mestrado. CEFET-PR. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia. Curitiba, 2005.
- DUTRA, R.M. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor eólico brasileiro**. Tese de Mestrado. UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia – COPPE. Rio de Janeiro, 2001.
- Hau, E., “**Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics**”, Ed. Springer, 2 Ed, Germany, 2005.
- Burton, T., D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, “**Wind energy handbook**”, Ed. John Wiley & Sons - Ltd, New York, 2001.
- Heier, S., “**Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems**”. John Wiley & Sons Ltd, New York, 1998.
- Voltolini, H., **Modelagem e Controle de Geradores de Indução Duplamente Alimentados com Aplicação em Sistemas Eólicos**, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis-SC, 2007.
- Silva, C.E.A., Oliveira, D.S., Barreto, L.H.S.C., Bascope, R.P.T., “**A Novel Three- Phase Rectifier With High Power Factor For Wind Energy Conversion Systems**”, In: Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian , vol., no., pp.985-992, Sept. 27 2009-Oct. 1 2009.
- Stiebler, M., “**Wind Energy Systems for Electric Power Generation**”, Ed. Springer, New York, 2008.
- Mutschler, P., Hoffmann, R., “**Comparison of Wind Turbines Regarding their Energy Generation**”, In: IEEE 33rd Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, v. 1, Cairns, Qld., Australia, , p. 6–11, June, 23–27, 2002.
- Hansen A. D., Hansen, L. H., “**Market penetration of wind turbine concepts over the years**”, In: Wind Energy, vol. 10, pp. 81–97, 2007.
- Li, H., Chen, Z., “**Overview of different wind generator systems and their comparisons**”, In: Renewable Power Generation, IET , vol.2, no.2, pp.123-138, June 2008.

Hansen, L. H., Helle, L., Blaabjerg, F., Ritchie, E., Munk-Nielsen, S., Bindner, H., Sørensen, P., Bak-Jensen, B., “**Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines**”, In: Report of Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001.

Lima, F. K. de A., **Aerogerador Baseado em Máquina de Indução Duplamente Alimentada - Suportabilidade para Afundamento de Tensão**, Tese de doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro – RJ, 2009.

Patel, M. R., “**Wind and Solar Power Systems**”, Boca Raton, Florida, EUA, 1999;

Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, H. A., Pinheiro J. R., Hey, H.L., “**A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System**”. 7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COBEP, Fortaleza, Brasil, 2003;

Rosas, P., Estanqueiro, A., “**Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas**”, Volume 1, Recife – PE, 2003.

www.aneel.gov.br visualizado em 05/01/11.

www.ons.org.br visualizado em 27/01/11.

www.wwindea.org visualizado em 06/01/11.

www.wobben.com.br visualizado em 09/01/11.

www.impsa.com.br visualizado em 09/01/11.

www.vestas.com visualizado em 09/01/11.

www.geenergy.com visualizado em 09/01/11.

www.suzlon.com.br visualizado em 09/01/11.

www.energiaeolicabrasil.blogspot.com visualizado em 10/01/11.

www.btm.dk visualizado em 15/01/11.

www.cresesb.cepel.br visualizado em 04/01/11.

www.abeeolica.org.br visualizado em 21/01/11.

www.casacivil.pb.gov.br visualizado em 28/01/11.

www.pacifichydro.com.au/pt-br visualizado em 08/01/11.

www.hsw.uol.com.br visualizado em 13/01/11.

www.mpiengenharia.com.br visualizado em 22/01/11.

www.revistatechne.com.br visualizado em 17/01/11.

www.a-casa-ecologica.blogspot.com visualizado em 17/01/11.

www.noticias-alternativas.blogspot.com visualizado em 17/01/11.

Anexo A

Position 2009	Country / Region	Total capacity end 2009	Added capacity 2009	Growth rate 2009	Position 2008	Total capacity end 2008	Total capacity end 2007	Total capacity end 2006
		[MW]	[MW]	[%]		[MW]	[MW]	[MW]
1	USA	35.159,0	9.922,0	39,3	1	25.237,0	16.823,0	11.575,0
2	China	26.010,0	13.800,0	113,0	4	12.210,0	5.912,0	2.599,0
3	Germany	25.777,0	1.880,0	7,9	2	23.897,0	22.247,4	20.622,0
4	Spain	19.149,0	2.460,0	14,7	3	16.689,0	15.145,1	11.630,0
5	India	10.925,0	1.338,0	14,0	5	9.587,0	7.850,0	6.270,0
6	Italy	4.850,0	1.114,0	29,8	6	3.736,0	2.726,1	2.123,4
7	France	4.521,0	1.117,0	32,8	7	3.404,0	2.455,0	1.567,0
8	United Kingdom	4.092,0	897,0	28,1	8	3.195,0	2.389,0	1.962,9
9	Portugal	3.535,0	673,0	23,5	10	2.862,0	2.130,0	1.716,0
10	Denmark	3.497,0	334,0	10,6	9	3.163,0	3.125,0	3.136,0
11	Canada	3.319,0	950,0	40,1	11	2.369,0	1.846,0	1.460,0
12	The Netherlands	2.240,0	5,0	0,2	12	2.235,0	1.747,0	1.559,0
13	Japan	2.056,0	176,0	9,4	13	1.880,0	1.528,0	1.309,0
14	Australia	1.877,0	383,0	25,6	14	1.494,0	817,3	817,3
15	Sweden	1.579,0	512,0	48,0	16	1.066,9	831,0	571,2
16	Ireland	1.260,0	233,0	22,7	15	1.027,0	805,0	746,0
17	Greece	1.109,0	119,0	12,0	18	989,7	873,3	757,6
18	Austria	995,0	0,0	0,0	17	994,9	981,5	964,5
19	Turkey	796,5	463,1	138,9	25	333,4	206,8	64,6
20	Poland	666,0	194,0	41,1	19	472,0	276,0	153,0
21	Brazil	600,0	261,5	77,3	24	338,5	247,1	236,9
22	Belgium	555,0	171,0	44,6	22	383,6	286,9	194,3
23	New Zealand	497,0	172,0	52,9	26	325,3	321,8	171,0
24	Chinese Taipeh	436,0	78,0	21,8	23	358,2	279,9	187,7
25	Norway	431,0	2,0	0,5	20	429,0	333,0	325,0
26	Egypt	430,0	40,0	10,3	21	390,0	310,0	230,0
27	Mexico	402,0	317,0	372,9	34	85,0	85,0	84,0
28	Korea (South)	364,4	86,4	31,1	27	278,0	192,1	176,3
29	Morocco	253,0	129,0	104,0	32	124,0	125,2	64,0
30	Bulgaria	214,2	56,7	36,0	28	157,5	56,9	36,0
31	Hungary	201,0	74,0	58,3	31	127,0	65,0	60,9
32	Czech Republic	191,0	41,0	27,3	29	150,0	116,0	56,5
33	Finland	147,0	4,0	2,8	30	143,0	110,0	86,0
34	Estonia	142,3	64,0	81,8	36	78,3	58,6	33,0
35	Costa Rica	123,0	49,5	66,9	37	74,0	74,0	74,0
36	Lithuania	91,0	37,0	68,0	38	54,4	52,3	55,0
37	Ukraine	90,0	0,0	0,0	33	90,0	89,0	85,6
38	Iran	82,0	0,0	0,0	35	82,0	66,5	47,4
39	Chile	78,0	58,0	288,6	47	20,1	20,1	2,0
40	Nicaragua	40,0	40,0	new	new	0,0	0,0	0,0
41	Luxembourg	35,3	0,0	0,0	39	35,3	35,3	35,3
42	Philippines	33,0	8,0	31,8	42	25,2	25,2	25,2
43	Argentina	29,8	0,0	0,0	41	29,8	29,8	27,8
44	Jamaica	29,7	9,0	43,5	44	20,7	20,7	20,7
45	Latvia	28,5	1,6	5,9	40	26,9	26,9	26,9

Position 2009	Country / Region	Total capacity end 2009 [MW]	Added capacity 2009 [MW]	Growth rate 2009 [%]	Position 2008	Total capacity end 2008 [MW]	Total capacity end 2007 [MW]	Total capacity end 2006 [MW]
46	Croatia	27,8	9,6	52,9	50	18,2	17,2	17,2
47	Netherlands Antilles	24,3	12,0	97,6	54	12,3	12,3	12,0
48	South Africa	21,8	0,0	0,0	43	21,8	16,6	16,6
49	Guadeloupe	20,5	0,0	0,0	45	20,5	20,5	20,5
49	Uruguay	20,5	0,0	0,0	46	20,5	0,6	0,2
51	Colombia	20,0	0,0	0,0	49	19,5	19,5	19,5
51	Tunisia	20,0	0,0	0,0	48	20,0	20,0	20,0
53	Switzerland	17,6	4,0	29,0	52	13,8	11,6	11,6
54	Russia	16,5	0,0	0,0	51	16,5	16,5	15,5
55	Romania	14,0	7,0	100,0	56	7,0	7,8	2,8
56	Guyana	13,5	0,0	0,0	53	13,5	13,5	13,5
57	Vietnam	8,8	7,5	600,0	66	1,3	0,0	0,0
58	Cuba	7,2	0,0	0,0	55	7,2	2,1	0,5
59	Israel	6,0	0,0	0,0	57	6,0	6,0	7,0
59	Slovakia	6,0	0,0	0,0	58	6,0	5,0	5,0
59	Pakistan	6,0	0,0	0,0	58	6,0	0,0	0,0
62	Faroe Islands	4,1	0,0	0,0	60	4,1	4,1	4,1
63	Cape Verde	2,8	0,0	0,0	62	2,8	2,8	2,8
64	Ecuador	2,5	0,0	0,0	61	4,0	3,1	0,0
65	Mongolia	2,4	0,0	0,0	63	2,4	0,0	0,0
66	Nigeria	2,2	0,0	0,0	64	2,2	2,2	2,2
67	Belarus	1,9	0,9	77,3	68	1,1	1,1	1,1
68	Antarctica	1,6	1,0	165,0	73	0,6	0,0	0,0
69	Jordan	1,5	0,0	0,0	65	1,5	1,5	1,5
70	Indonesia	1,4	0,2	16,7	67	1,2	1,0	0,8
71	Martinique	1,1	0,0	0,0	68	1,1	1,1	1,1
72	Falkland Islands	1,0	0,0	0,0	70	1,0	1,0	1,0
73	Eritrea	0,8	0,0	0,0	71	0,8	0,8	0,8
74	Peru	0,7	0,0	0,0	72	0,7	0,7	0,7
75	Kazakhstan	0,5	0,0	0,0	74	0,5	0,5	0,5
75	Namibia	0,5	0,0	0,0	74	0,5	0,5	0,3
75	Syria	0,5	0,1	22,5	76	0,4	0,3	0,3
78	Dominican Republic	0,2	0,0	0,0	77	0,2	0,0	0,0
79	Dominica	0,2	0,0	0,0	77	0,2	0,0	0,0
80	North Korea	0,2	0,0	0,0	77	0,2	0,0	0,0
81	Algeria	0,1	0,0	0,0	80	0,1	0,0	0,0
82	Bolivia	0,01	0,0	0,0	81	0,01	0,01	0,01
Total		159.213,3	38.312,0	31,7		120.902,9	93.930,4	74.122,8

Figura A - Ranking mundial na geração de energia eólica até 2009.

Fonte: WWEA (2011).

Anexo B

Position 2009	Country	Total Offshore Capacity [MW] end 2009	New Offshore Capacity [MW] installed in 2009	Total Offshore Capacity [MW] end 2008	Rate of Growth [%]
1	United Kingdom	688,0	104,0	574,0	18,1
2	Denmark	663,6	237,0	426,6	55,6
3	Netherlands	247,0	0,0	247,0	0,0
4	Sweden	164,0	30,0	134,0	22,4
5	Germany	72,0	60,0	12,0	500,0
6	Belgium	30,0	0,0	30,0	0,0
7	Finland	30,0	0,0	30,0	0,0
8	Ireland	25,0	0,0	25,0	0,0
9	China	23,0	21,0	2,0	1050,0
10	Spain	10,0	0,0	10,0	0,0
11	Norway	2,3	2,3	0,0	/
12	Japan	1,0	0,0	1,0	0,0
TOTAL		1955,9	454,3	1491,6	30,5

Figura B - Ranking mundial na geração de energia eólica em sistemas OFFSHORE até 2009.

Fonte: WWEA (2011).

