



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

ERICK BARRETO XAVIER LEITE

**ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DO PARQUE
EÓLICO ALEGRIA**

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2012

ERICK BARRETO XAVIER LEITE

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DO PARQUE
EÓLICO ALEGRIA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Centro de Engenharia Elétrica e Informática 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: Geração de Energia Eólica

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Outubro de 2012

ERICK BARRETO XAVIER LEITE

ENERGIA EÓLICA E O ESTUDO DE CASO DO PARQUE EÓLICO ALEGRIA

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Centro de Engenharia Elétrica e Informática 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: Geração de Energia Eólica

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 à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, acima de tudo, pela oportunidade que me deram de sair de casa e cursar elétrica, as palavras de carinho e apoio que foram ditas quando necessário e quando não também.

A minha vó querida por todo o suporte que me deu, de coração aberto me recebeu em sua casa e tornou a minha permanência em Campina Grande mais tolerável.

Ao meu querido orientador, Pr. Leimar de Oliveira que foi muito mais que um orientador, foi um grande amigo que fez nessa fase final do curso, esbanjando todo o seu conhecimento e carisma, transformou o que poderia ser um trabalho traumático em uma atividade divertidíssima.

“Um mago nunca está atrasado, ou adiantado. Ele sempre chega quando é necessário.”

Gandalf, o Branco

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 como um complemento ao modelo de geração atual. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica, incluindo um breve estudo sobre os ventos e os princípios básicos do funcionamento dos aerogeradores e as tecnologias empregadas no seu funcionamento. São expostos dados sobre o cenário da energia eólica nacional, com ênfase na região nordeste. Em seguida, são apresentadas algumas aplicações eólicas sustentáveis e tendências para o futuro da rede elétrica. Por fim, é apresentada a estrutura do parque eólico Alegria, no litoral norte do Rio Grande do Norte.

Palavras-chave: Energia Eólica, Parque Eólica Alegria.

ABSTRACT

This paper analyzes the wind and pointing at the prospect of a better use of wind power as a renewable source for electricity generation as a complement to the current generation model. We begin with a bibliographic review, including a brief study of the winds and the basic principles of operation of the wind turbines and the technologies employed in its operation. Are exposed data about the national scenario of wind energy, with emphasis on the Northeast. Then, some applications are presented sustainable wind and trends for the future of the electric grid. Finally, we present the structure of the wind farm Alegria, on the northern coast of Rio Grande do Norte.

Keywords: Wind Energy, Wind Farm Alegria.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de Circulação Global	5
Figura 2. Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.....	6
Figura 3. Trajetória da máxima potência.....	7
Figura 4. Relação coeficiente de potência/número de pás.....	8
Figura 5. Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.....	10
Figura 6. Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius	11
Figura 7. Turbina eólica de eixo horizontal.....	12
Figura 8. Sistema OFFSHORE.....	15
Figura 9. Sistema ONSHORE.....	15
Figura 10. Velocidade média anual dos ventos.....	18
Figura 11. Mapa do potencial eólico do Brasil (Fonte: CRESESB).....	19
Figura 12. Regime de precipitação/temperatura na região Sudeste.....	20
Figura 13. Regime de precipitação/temperatura na região Norte.....	21
Figura 14. Regime de precipitação/temperatura na região Nordeste.....	21
Figura 15. Regime de precipitação/temperatura na região Centro-Oeste.....	21
Figura 16. Regime de precipitação/temperatura na região Sul.....	22
Figura 17. Sazonalidade das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste.....	22
Figura 18. Mapa do potencial eólico do Nordeste.....	22
Figura 19. Condição trimestral do Brasil.....	23
Figura 20. Potência eólica instalada no mundo, entre 1996 e 2008.....	27
Figura 21. Tendência do crescimento eólico projetada até 2020 (WWEA, 2011).....	27
Figura 22. Vista frontal do BWTC.....	31
Figura 23. Vista dos 3 aerogeradores do BWTC.....	31
Figura 24. Sistema de comunicação idealizado no Smart Grid.....	33
Figura 25. Vista do parque eólico Alegria I.....	34
Figura 26. Vista do parque eólico Alegria I.....	35
Figura 27. Efeito Esteira.....	36
Figura 28. Modelo de distribuição de turbinas em um parque eólico.....	37
Figura 29. Leiaute do Parque Eólico Alegria I.....	38
Figura 30. Leiaute do Parque Eólico Alegria I.....	38
Figura 31. Leiaute do Parque Eólico Alegria.....	39
Figura 32. Leiaute do Parque Eólico Alegria.....	39
Figura 33. Base do aerogerador.....	40
Figura 34. Içamento e encaixe do segundo tramo.....	40
Figura 35. Aerogerador Vestas V82-165.....	41
Figura 36. Corte lateral da turbina.....	42
Figura 37. Curva de potência em relação a velocidade do vento.....	42
Figura 38. Curva de coeficiente de potência em relação a velocidade do vento.....	43
Figura 39. Integração do parque eólico a rede elétrica do Rio Grande do Norte.....	44
Figura 40. Localização das torres anemométricas (COSERN).....	45
Figura 41. Detalhe da torre anemométrica (COSERN).....	46
Figura 42. Torre de monitoramento anemométrico de 50 metros de altura (COSERN).....	46
Figura 43. Estatísticas apresentadas pelo sistema de armazenamento da torre anemométrica (COSERN).....	47
Figura 44. Velocidade média anual dos ventos a 75m de altura (COSERN).....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Definição das classes de energia.....	19
Tabela 2. Distribuição dos parques eólicos no Brasil (ANEEL, 2012).	24
Tabela 3. Legenda da nomenclatura para designar o destino da energia.	26
Tabela 4.. Potencial de Geração eólica.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

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 – 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

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 $1,2 \text{ Kg/m}^3$)

C_p - Coeficiente de potência

β - Ângulo de passo (*Pitch angle*)

λ – Velocidade específica (*Tip speed ratio*)

BWTC - Bahrain World Trade Center

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

BNB - Banco do Nordeste do Brasil

CHESF - Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

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

SUMÁRIO

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas e Siglas	xi
Sumário	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	2
1.1.1 Objetivo Geral	2
1.1.2 Objetivo Específico	2
1.2 Estrutura do Trabalho	2
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 O Vento.....	4
2.2 Aproveitamento da Energia Cinética dos Ventos	5
2.3 Composição de um Sistema de Conversão Eólica	5
2.3.1 Turbina Eólica	6
2.3.2 Gerador Elétrico	8
2.3.3 Conversores Estáticos.....	9
2.4 Modelos de Turbinas.....	9
2.4.1 Turbina Eólica de Eixo Vertical	9
2.4.2 Turbina Eólica de Eixo Horizontal	11
2.5 Aplicação e Impactos Ambientais.....	14
2.5.1 Aplicação.....	14
2.5.2 Impactos Ambientais	15
3 Potencial Eólico Brasileiro	17
3.1 Potencial Eólico do Nordeste.....	20
3.2 Usinas Eólicas instaladas no Brasil.....	23
4 Tendências para o futuro	27
4.1 Tamanho dos rotores.....	28
4.2 Custo da Energia Eólica.....	28
5 Estado da Arte	30
5.1 Edifícios Auto-Suficientes em Energia	30
5.2 Smart Grid.....	32
6 Estudo de Caso	34
6.1 Caso Guimarães.....	34
6.1.1 A Empreendedora e o Investimento.....	35

6.1.2	Leiaute do Parque	36
6.1.3	Montagem das Estruturas	40
6.1.4	Modelo de Aerogerador Utilizado	41
6.1.5	Integração à Linha de Transmissão	43
6.1.6	Mapeamento do Potencial Eólico do Rio Grande do Norte	44
6.1.7	Potencial Eólico do Rio Grande Do Norte.....	48
7	Conclusão	50
	Referências Bibliográficas.....	52

1 INTRODUÇÃO

A necessidade do homem em aprimorar as técnicas agrícolas, deu início à utilização de energia eólica, através dos moinhos de vento, que auxiliavam o homem em tarefas como moagem de grãos, bombeamento de água e serviços de serraria. Os moinhos mais primitivos consistiam de um eixo vertical acionado por uma longa haste movida por homens ou animais, que caminhavam dentro de uma gaiola conectada ao eixo horizontal.

Usando os cursos d'água como força motriz, foi possível aperfeiçoar esses moinhos, gerando as rodas d'água. Como não se dispunha de rios em todos os lugares, a utilização do vento como força motriz possibilitou o surgimento dos moinhos de vento como substituto da força motriz humana ou animal nas atividades.

Com o avanço da rede elétrica, várias pesquisas foram feitas no intuito de aprimorar o aproveitamento de energia eólica em grandes blocos de energia. No Brasil, a primeira turbina foi instalada em junho de 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha-PE, uma turbina com gerador assíncrono de 75 kW de potência, rotor com 17 metros de diâmetro e torre de 23 metros de altura.

Atualmente, a utilização de energia eólica para gerar energia elétrica esta ganhando mais espaço. O potencial eólico brasileiro vem estimulando iniciativas para desenvolvimento de tecnologias e implantação de parques eólicos pelo país. O governo federal criou em 2002 o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), onde foi prevista a instalação de 3.300 MW em projetos envolvendo fontes de energia renováveis até o final de 2006, que foi prorrogada até 2009 e por fim, não foi cumprida. A segunda etapa do programa prevê o atendimento de 10% da demanda anual de energia elétrica no país por fontes renováveis. Mesmo com a não conclusão da primeira etapa, o programa gerou maiores investimentos para a área de geração eólica do país.

1.1 OBJETIVOS

A seguir, serão descritos os objetivos da proposta deste trabalho, tanto em caráter geral como específico.

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão sobre os conceitos básicos que envolvem a conversão de energia eólica em energia elétrica, tipos de ventos, partes componentes dos aerogeradores, modelos de turbinas, mapas e potenciais eólicos nacionais, aspectos econômicos e custos, tendências para o futuro e modelos de sustentabilidade serão alguns dos temas apresentados.

1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Fazer um estudo de caso do parque eólico Alegria, composto por dois parques menores, o Alegria I e o Alegria II, localizado na região de Guamaré, no estado do Rio Grande do Norte. Serão levados em consideração os seguintes aspectos: potência instalada, custo das implementações, modelo dos geradores e empresas proprietárias do parque.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 será feita uma revisão bibliográfica sobre energia eólica abordando assuntos como a formação dos ventos, composição de um sistema de conversão de energia eólica em energia elétrica, componentes de um aerogerador, modelos de turbinas e tipos de aplicações eólicas.

No capítulo 3 serão apresentados dados referentes a situação atual da energia eólica no Brasil, com ênfase no Nordeste. Um panorama da capacidade instalada também será apresentado.

O capítulo 4 apresenta as tendências para o futuro, abordando a evolução dos tamanhos dos rotores e os custos relacionados aos processos que envolvem a geração de energia eólica.

O capítulo 5 apresenta alguns exemplos do estado da arte, o ápice da utilização da tecnologia eólica e a integração da mesma com a rede elétrica de uma maneira mais eficiente, através do Smart Grid.

O Capítulo 6 descreve o estudo de caso do parque eólico Alegria, apresentado o modelo de turbina utilizado no parque, os custos da implementação do projeto, os dados estatísticos do parque e as empresas envolvidas na construção do mesmo.

No capítulo 7 serão feitas considerações finais sobre o trabalho, levando em consideração tudo que foi apresentado e por fim, têm-se a bibliografia e fontes utilizadas para a pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo em questão trata de uma revisão simplificada sobre alguns pontos que envolvem a energia eólica, desde a formação dos ventos e o aproveitamento dessa forma de energia para a conversão em energia elétrica, assim como trata dos impactos ambientais causados pelo uso da energia eólica.

2.1 O VENTO

O vento é um recurso proveniente da incidência solar não uniforme sobre o planeta, essa não uniformidade é, entre outros fatores, causada pela orientação dos raios solares e movimentos de rotação e translação da terra. Quando o sol aquece determinada área, o ar contido nessa área aquece e se eleva, uma vez que é mais leve que o mesmo volume de ar frio. O espaço vazio deixado pelo ar quente rapidamente é preenchido pelo ar frio, esta massa de ar é conhecida como vento.

O movimento das massas de ar pode ser definido como um fenômeno global. O ar é aquecido nas regiões tropicais e torna-se menos denso tendendo a assumir um movimento ascendente. Nas camadas inferiores, ele é substituído pelo ar frio em movimento das regiões polares. Se adotássemos apenas esse mecanismo para explicar a circulação de ar no planeta, teríamos então a formação de duas células, uma por hemisfério.

Por outro lado, vê-se que durante a movimentação do ar em direção aos pólos a temperatura das partículas cai repentinamente, de tal forma que em menos de um terço do percurso até os pólos a temperatura já se revela de tal forma reduzida que já é suficiente para estabelecer um movimento descendente nas massas de ar. Parte da massa de ar descendente segue em direção ao equador formando a célula tropical (células de Hadley – uma em cada hemisfério), já a massa de ar que segue em direção aos pólos, próximo à superfície da terra, enfrenta um novo aquecimento, o qual estabelece um novo movimento ascendente, formando então a célula temperada (células de Ferrel – uma em cada hemisfério). Mais uma vez a parcela do ar em movimento ascendente toma a direção dos pólos constituindo assim, a célula polar (uma em cada hemisfério).

O mecanismo acima adotado para explicar a circulação de ar no planeta define um modelo de circulação de seis células, como apresentado na Figura 1 (HIRATA, 2000).

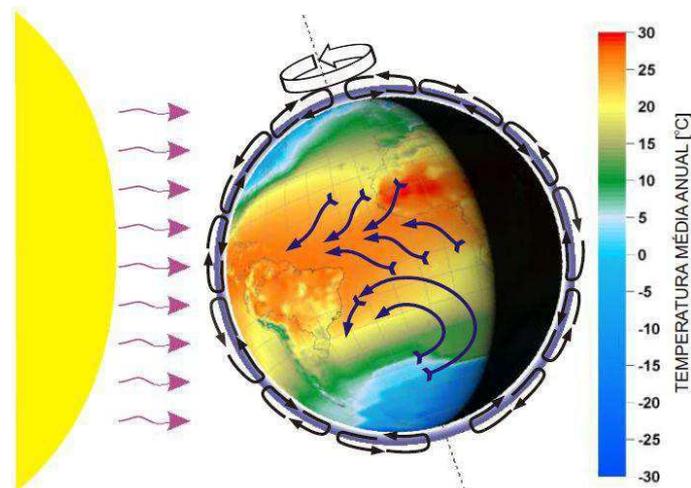


Figura 1. Sistema de Circulação Global
(Fonte: mapa eólico RN).

2.2 APROVEITAMENTO DA ENERGIA CINÉTICA DOS VENTOS

O aproveitamento da energia dos ventos para a geração de eletricidade ocorre pela conversão de parte da energia cinética, disponível no ar em movimento, utilizando o aerogerador. A conversão pelo aerogerador consiste em duas fases: 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.

2.3 COMPOSIÇÃO DE UM SISTEMA DE CONVERSÃO EÓLICA

Em sistemas de médio e grande porte, o sistema de conversão eólio-elétrica é basicamente composto por uma turbina eólica, um gerador elétrico, um sistema de controle e engrenagens utilizadas para aumentar a velocidade do eixo das pás e transmitir para o eixo do gerador elétrico.

2.3.1 TURBINA EÓLICA

A função principal da turbina eólica é converter a energia cinética dos ventos em conjugado mecânico. Quando acoplada a um sistema de transmissão e um gerador elétrico, essa energia é convertida em energia elétrica pela conversão eletromecânica. A energia cinética do vento por unidade de volume, pode ser calculada pela equação 1:

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

Na equação 1, ρ é massa específica do ar. A potência disponível é, portanto:

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

Onde “A”, na equação 2, é a área da secção transversal que intercepta perpendicularmente um fluxo de ar.

Devido a características intrínsecas à turbina e sua aerodinâmica, a quantidade máxima de energia eólica que pode ser convertida em energia elétrica é de 59,3%. 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). Entretanto, na prática o limite de Betz não pode ser atingido devido a imperfeições no design das pás e perdas relacionadas a turbulência e arrasto.

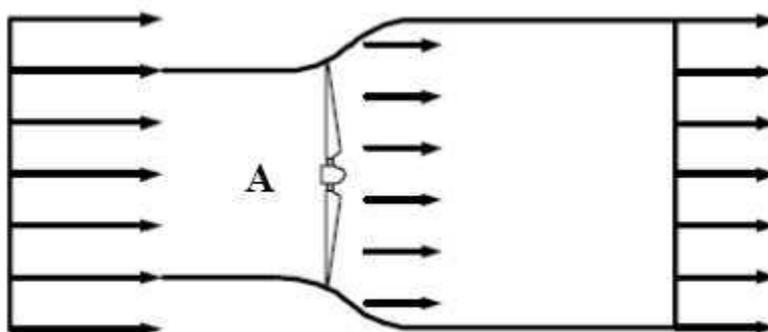


Figura 2. Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina (fonte: tese COPE).

Como apenas parte dessa energia cinética pode ser convertida em energia mecânica, o rendimento da turbina é influenciado pela sua curva de coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$. Esta curva é função da razão da velocidade de ponta da pá λ e a velocidade do vento e do ângulo de passo das pás β , que tem seus valores alterados em função das características aerodinâmicas das pás. A potencia que pode ser extraída por uma turbina eólica de 3 pás com eixo horizontal pode ser calculada a partir da Equação 3:

$$P_m = \frac{1}{2} * \rho * A * C_p(\lambda, \beta) * V_v^3 \quad (3)$$

Um sistema de conversão eólico pode ser classificado como de velocidade fixa, variável ou limitada. Os sistemas que operam com velocidade constante só conseguem extrair a máxima potência da turbina em uma pequena faixa de velocidades do vento, que geralmente é a velocidade mais frequente na região. Nos sistemas com velocidade variável, o ganho pode variar de 3% a 28% quando comparados com o de velocidade fixa, dependendo das condições do vento e dos parâmetros da turbina. A curva de potência extraída por uma turbina eólica, em função da velocidade da turbina, pode ser observada na Figura 3.

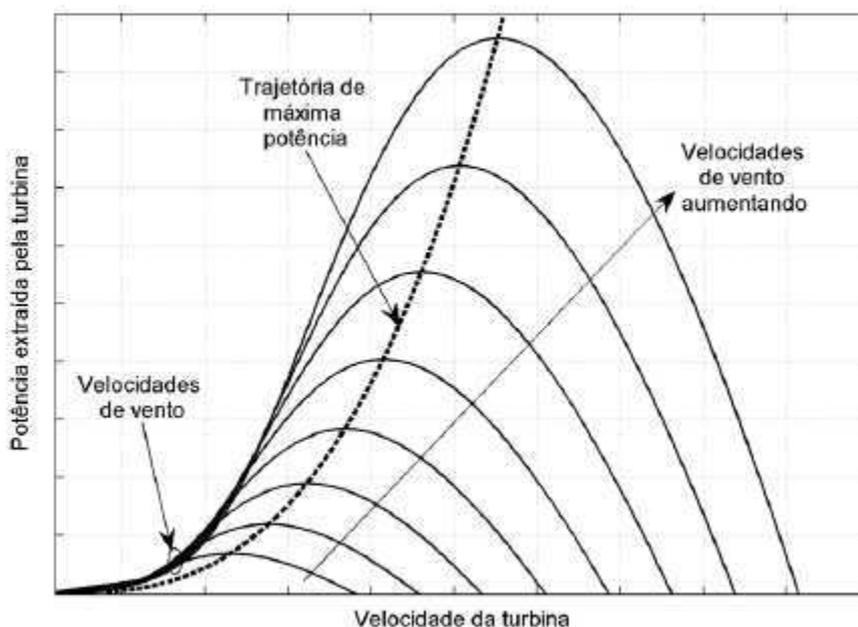


Figura 3. Trajetória da máxima potência (fonte: tese COPE).

Em relação à quantidade de pás utilizadas na turbina, tem-se na figura 5 mostra a influência do número de pás no coeficiente de potência.

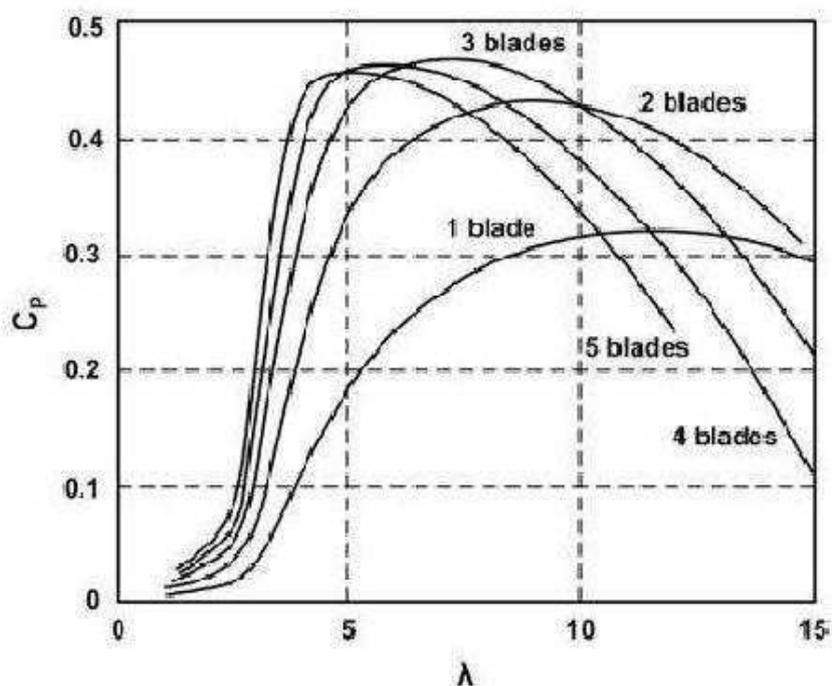


Figura 4. Relação coeficiente de potência/número de pás (fonte: tese COPE).

Turbinas de eixo horizontal com duas e três pás são as que permitem maior aproveitamento da energia eólica com velocidades entre 7m/s e 15m/s, as mais comumente utilizadas, são as turbinas de eixo horizontal com três pás.

2.3.2 GERADOR ELÉTRICO

Na conversão de energia eólica em energia elétrica, máquinas elétricas são empregadas como geradores elétricos, acoplados a um sistema de transmissões que, por sua vez, é ligado ao eixo das pás do aerogerador. Dentre as máquinas existentes, a máquina de corrente contínua não é mais de interesse prático como gerador devido a uma série de desvantagens.

As máquinas assíncronas, quando aplicadas em sistemas eólicos de geração, são conhecidas como geradores de indução duplamente alimentados (DFIG). Recentemente,

para tentar reduzir o custo de manutenção destas máquinas, estudos são feitos para aperfeiçoar a utilização dos geradores duplamente alimentados sem escovas (BDFIG).

2.3.3 CONVERSORES ESTÁTICOS

Para processar a energia entregue pelo gerador, se faz necessário o uso de conversores estáticos, na maioria dos casos, dois são utilizados. No primeiro estágio, é utilizado um retificador trifásico para fornecer nível contínuo podendo esse barramento ser fixo ou não. O segundo estágio pode ser composto por um conversor CC/CC, que pode ser utilizado carregando baterias ou suprindo cargas CC isoladas.

A utilização de conversores de potência em sistemas eólicos é vantajosa, pois possibilitam que a turbina opere com velocidade variável, maximiza a energia que é extraída do gerador, permite o controle das potências ativa e reativa que são injetadas na rede e, por fim, provê a proteção eletrônica para a turbina e seus componentes, evitando danos em condições extremas de vento.

2.4 MODELOS DE TURBINAS

Se tratando em turbinas eólicas, hoje existem dois modelos principais no mercado: turbina eólica de eixo horizontal (TEEH) e turbina eólica de eixo vertical (TEEV).

2.4.1 TURBINA EÓLICA DE EIXO VERTICAL

A turbina eólica de eixo vertical, como na sua definição, tem o seu eixo montado na vertical, perpendicular ao solo. São turbinas menos usuais do que as de eixo horizontal. O fato de ter um eixo vertical permite que esteja sempre alinhada com o vento, o que elimina a necessidade de ajustes de ângulo quando há alteração na direção do vento. Ao invés de usar uma torre como sustentação, as TEEVs são estaiadas no solo, ocasionando em menor elevação do rotor e conseqüentemente, ventos mais lentos e eficiência reduzida em comparação a uma TEEH. Além disso, possui acentuada vibração em sua estrutura devido à rotação de suas pás.

Como vantagem, todos os equipamentos se encontram ao nível do solo, facilitando a instalação e manutenção dos mesmos. Mas isso significa uma área de base maior para a turbina, o que é uma desvantagem quando o objetivo é instalar várias turbinas em áreas de cultivo. As TEEVs podem ser utilizadas para pequenas demandas e para o bombeamento de água em áreas rurais. Os principais tipos de TEEVs são o Darrieus e Savonius. As Figuras 5 e 6 ilustram esses modelos de turbinas.



Figura 5. Turbina eólica de eixo vertical do tipo Darrieus.
(Fonte: <http://engambiente3.blogspot.com.br/>)



Figura 6. Turbina eólica de eixo vertical do tipo Savonius
(fonte: <http://www.archiexpo.com/>).

2.4.2 TURBINA EÓLICA DE EIXO HORIZONTAL

Turbina cujo eixo é montado paralelo ao solo, a turbina eólica de eixo horizontal é a mais comum no mercado e nos parques eólicos. Essas turbinas precisam se alinhar constantemente com a direção do vento, usando um mecanismo automático de ajuste. O sistema de ajuste consiste de motores elétricos e caixas de engrenagens que giram o aerogerador para a direita ou esquerda. O controlador eletrônico da turbina lê a posição de um dispositivo mecânico ou eletrônico e ajusta a posição do rotor para capturar o máximo de energia disponível pelo vento. A TEEH é elevada com o auxílio de uma torre que a coloca a uma altura ideal para a velocidade do vento. A Figura 7 ilustra uma TEEH.



Figura 7. Turbina eólica de eixo horizontal
(fonte: <http://www.dforcesolar.com>).

A seguir são apresentados os principais componentes do aerogerador de eixo horizontal que são, de uma maneira geral:

- **Torre:** Item fundamental para sustentar e posicionar o rotor. Capaz de sustentar o grande peso das partes componentes do aerogerador que ficam na nacela. É responsável por grande parte do custo de instalação da turbina eólica.

Antigamente eram utilizadas torres metálicas para sustentação da turbina, porém, com o avanço dos geradores e o aumento de suas dimensões, passou-se a utilizar torres de metal tubular ou concreto.

- **Nacela:** É a carcaça do aerogerador montada sobre a torre, abriga as partes componentes do sistema de geração de energia como o gerador e caixa multiplicadora, além do eixo e freios do sistema.

- **Eixo:** O eixo da turbina eólica é conectado ao cubo do rotor. Quando o rotor gira, o eixo gira junto, transferindo sua energia mecânica rotacional para um gerador elétrico na outra extremidade.

- **Freios:** Os freios detêm a rotação do eixo do rotor em caso de sobrecarga de energia ou algum outro tipo de falha do sistema. Esses freios podem ser acionados de maneira manual, ou mais comumente, pelos acionadores dos sistemas de controle.

- **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 ao gerador. Como a velocidade angular dos rotores das turbinas varia entre 20 e 150 RPM, e os geradores tem velocidade nominal de operação entre 1200 e 1800 RPM, é necessário, um sistema de engrenagens para a multiplicação da velocidade entre os eixos do rotor e do gerador.

- **Pás do Rotor:** As pás são responsáveis pela interação com vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico rotacional no eixo. Atualmente são fabricadas em a fibra de vidro reforçada com epóxi. Nos modelos que usam controle de velocidade, a pá dispõe de rolamentos na sua base para que possa girar, modificando assim seu ângulo de ataque.

- **Sistemas de Controle Aerodinâmico da Potência:** As turbinas são projetadas de maneira que atinjam e consigam manter a máxima potência nominal no maior intervalo de tempo possível, para isso é necessário obter a mesma potência de saída para as diversas velocidades do vento possíveis na área em que foi instalado. Da mesma forma, o sistema de controle deve evitar esforços excessivos nos componentes mecânicos através de dispositivos que reduzem as forças aerodinâmicas geradas nas pás.

Para isto, o desenvolvimento das turbinas eólicas oferece atualmente três configurações que permitem o controle da potência gerada no rotor:

- **Controle Passivo de Perda de Eficiência Aerodinâmica:**

As pás são montadas no rotor em ângulo fixo, mas são projetadas de modo que a torção das próprias pás aplique a frenagem quando o vento for excessivo. As pás estão dispostas em ângulo, assim os ventos acima de certa velocidade causarão turbulência no lado contrário da pá, induzindo à perda da eficiência aerodinâmica. Em termos simples, a perda de eficiência aerodinâmica ocorre quando o ângulo da pá voltado para a chegada do vento se torna tão acentuado que começa a eliminar a força de empuxo, diminuindo a velocidade das pás.

- **Controle Ativo de Perda de Eficiência Aerodinâmica:**

As pás neste tipo de sistema de controle de potência possuem passo variável. 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.

- **Controle de Passo:** O controlador eletrônico da turbina monitora a geração de potência. Com velocidades do vento acima de 72 km/h, a geração de potência será excessiva, a ponto de o controlador ordenar que as pás alterem seu passo de modo que fiquem desalinhadas com o vento. Isto diminui a velocidade de rotação das pás. Este controle requer que o ângulo de montagem das pás seja ajustável.

2.5 APLICAÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS

2.5.1 APLICAÇÃO

A utilização da conversão eólica pode ser utilizada em sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. O dimensionamento desses sistemas é baseado em fatores climáticos, geográficos e a demanda existente, podendo ser instalada em terra (ONSHORE) ou no mar (OFFSHORE). Os parques e fazendas eólicas conhecidos hoje são exemplos de sistemas ONSHORE.

A instalação dos sistemas OFFSHORE, comparada a ONSHORE, apresenta um custo mais elevado de transporte, instalação e manutenção, em contrapartida, apresentam várias vantagens, entre elas, disposição de ventos mais velozes e constantes. Tem havido grandes investimentos na área OFFSHORE, projetos que visam a adaptação das turbinas para uso no mar. Tais projetos precisam de estratégias mais refinadas para transporte das máquinas, instalação e operação e todo projeto deve ser coordenado de forma a utilizarem os períodos onde as condições do mar propiciem um deslocamento e uma instalação segura. A Figura 8 e Figura 9 ilustram exemplos de sistemas OFFSHORE e ONSHORE.



Figura 8. Sistema OFFSHORE.

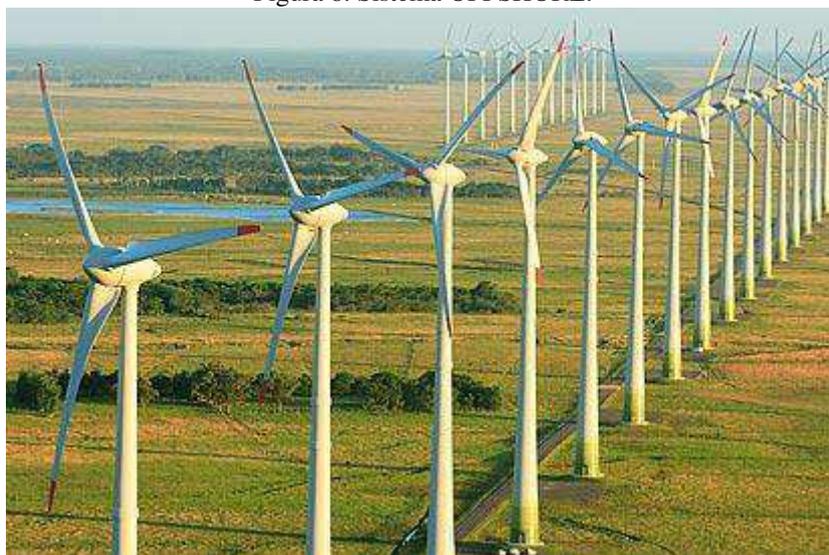


Figura 9. Sistema ONSHORE.

2.5.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

Os impactos considerados negativos dos parques eólicos que pode ser destacados são a poluição sonora e visual.

A poluição sonora é causada pelo ruído gerado pelas turbinas e pás, que pode causar algum incômodo. Com o avanço da tecnologia empregada nas turbinas, esse ruído deverá ser reduzido.

A poluição visual se dá ao passo que a instalação dos parques eólicos alteram as paisagens com suas torres e hélices, mas esses parques podem se integrar de tal modo ao meio ambiente virando até atração turística, gerando renda e promovendo o desenvolvimento regional.

Quando as turbinas são instaladas em rotas de migração, pode ameaçar aves que podem colidir nas pás.

3 POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 200.000 MW. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações (dados de superfície) e das diferentes metodologias empregadas.

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

Os recursos apresentados na legenda da Figura 10 referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50m acima da superfície para 5 condições topográficas distintas: *zona costeira* – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; *campo aberto* – áreas planas de pastagens, plantações e/ou vegetação baixa sem muitas árvores altas; *mata* – áreas de vegetação nativa com arbustos e árvores altas mas de baixa densidade, tipo de terreno que causa mais obstruções ao fluxo de vento; *morro* – áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto; *montanha* – áreas de relevo complexo, com altas montanhas.

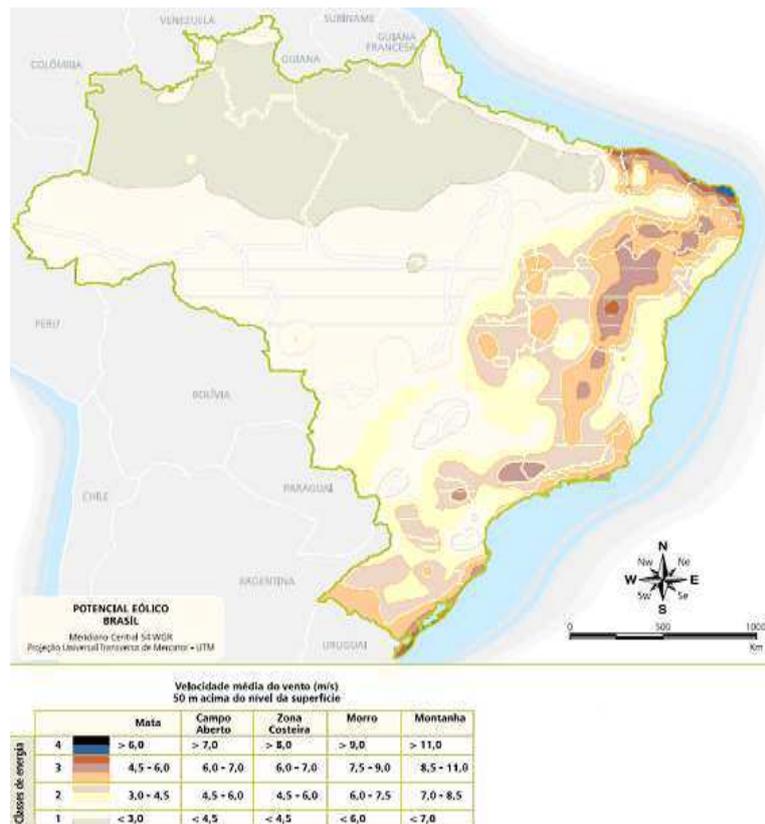


Figura 10. Velocidade média anual dos ventos.

A classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica. A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8,0 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão apresentará valores entre 4,5 e 6,0 m/s.

A Tabela 1 mostra a classificação das velocidades de vento e regiões topográficas utilizadas no mapa da Figura 10 os valores correspondem à velocidade média anual do vento a 50 m de altura em m/s (V_m) e à densidade média de energia em W/m^2 (E_m). Os valores de E_m foram obtidos para as seguintes condições padrão: altitude igual ao nível do mar, temperatura de $20^\circ C$ e fator de Weidbull de 2,5. A mudança de altitude para 1.000 m acima do nível do mar acarreta uma diminuição de 9% na densidade média de energia e a diminuição de temperatura para $15^\circ C$ provoca um aumento de cerca de 2% na densidade de energia média.

Tabela 1. Definição das classes de energia.

Classe	Mata		Campo aberto		Zona costeira		Morros		Montanhas	
	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)	V_m (m/s)	E_m (W/m ²)
4	> 6	> 200	> 7	> 300	> 8	> 480	> 9	> 700	> 11	> 1250
3	4,5 - 6	80 - 200	6 - 7	200 - 300	6,5 - 8	250 - 480	7,5 - 9	380 - 700	8,5 - 11	650 - 1250
2	3 - 4,5	25 - 80	4,5 - 6	80 - 200	5 - 6,5	100 - 250	6 - 7,5	200 - 380	7 - 8,5	300 - 650
1	< 3	< 25	< 4,5	< 80	< 5	< 100	< 6	< 200	< 7	< 300

Posteriormente, estudos resultaram no Mapa do Potencial Eólico Brasileiro, exibido no Figura 11, apresentando uma estimativa de 143,5 GW, segundo o Centro de Pesquisa em Energia Elétrica (Cepel) do Ministério de Minas e Energia feito em 2005. O estudo levou em conta geradores de energia eólica de até 50 metros. Com o avanço tecnológico no setor, que permite geradores de até 80 metros atualmente no Brasil, o potencial cresceria em torno de 50%.

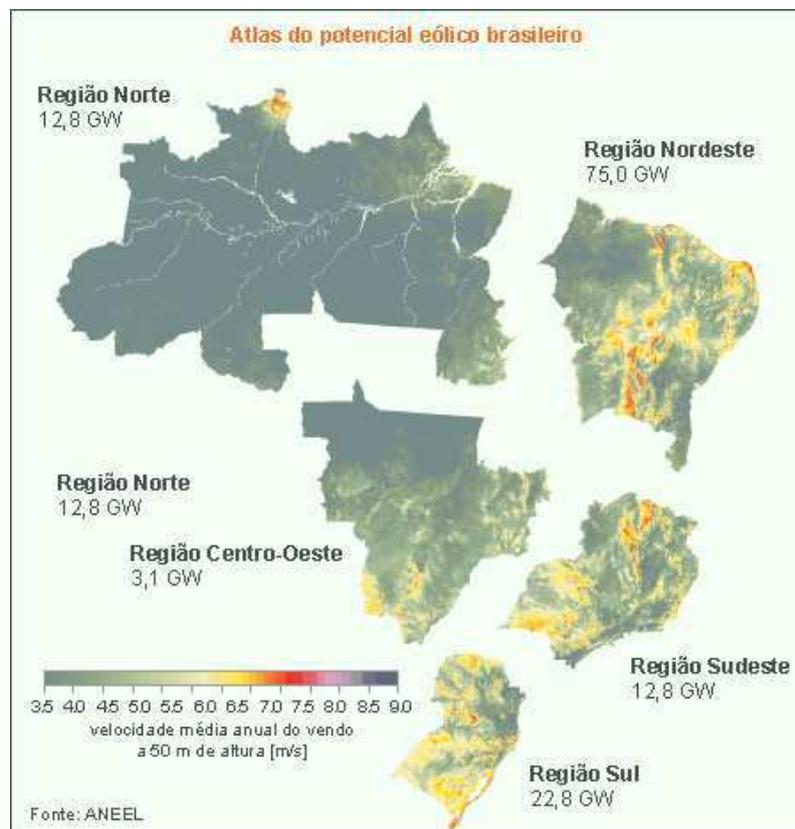


Figura 11. Mapa do potencial eólico do Brasil (Fonte: CRESESB).

Esse potencial de 143,5 GW representa a geração de energia suficiente para suprir 146 milhões de residências. Essa conta é meramente ilustrativa, uma vez que, a energia eólica não tem fornecimento constante, sua energia é armazenada em baterias ou trabalha em conjunto com as hidrelétricas, ajudando, por exemplo, no abastecimento dos reservatórios dessas usinas.

3.1 POTENCIAL EÓLICO DO NORDESTE

O Nordeste é a região com o melhor balanço eólico-hídrico do Brasil, tendo a capacidade de suprir as demais regiões, quando da diminuição do regime de chuvas, como pode ser visto da Figura 12 a Figura 16. O volume dos ventos é abundante na região nordeste justamente quando há menor vazão do Rio São Francisco, rio que abastece oito usinas, responsável por 90% da energia gerada no Nordeste, na Figura 17 é possível ver a sazonalidade das usinas eólicas no Nordeste.

Além disso, o Nordeste apresenta mais da metade do potencial eólico Brasileiro, com um potencial que equivale a aproximadamente 4 usinas de Itaipu, na ordem de 75 GW. Esse potencial está localizado tanto na faixa litorânea quanto no interior da região Nordeste, possibilitando uma melhor distribuição dos parques eólicos. O mapa da Figura 18 ilustra o potencial eólico Nordestino e o mapa da Figura 19 ilustra a condição eólica trimestral no Brasil.

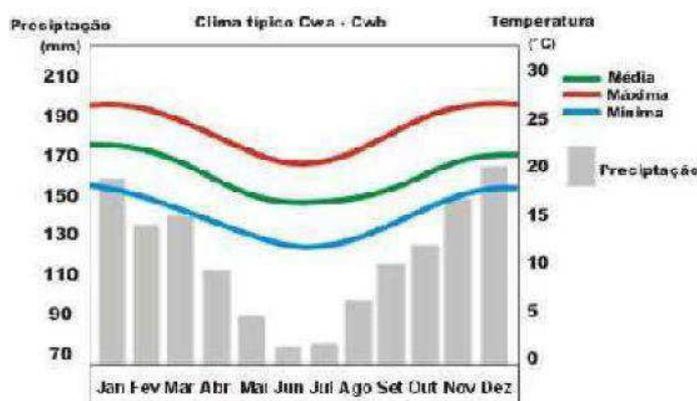


Figura 12. Regime de precipitação/temperatura na região Sudeste.
(Fonte: Climabrasileiro.hpg.ig.com.br)

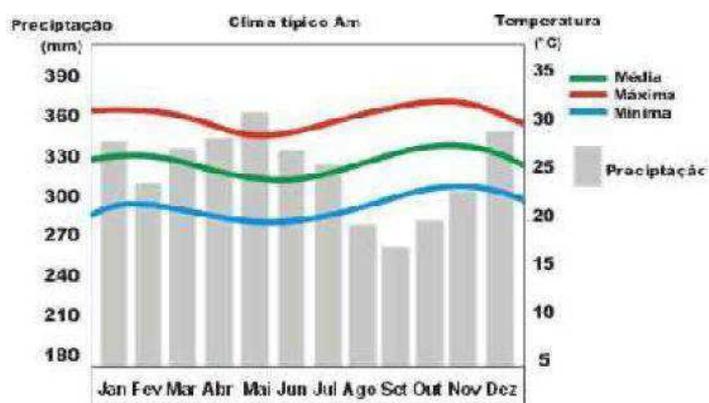


Figura 13. Regime de precipitação/temperatura na região Norte.
(Fonte: Climabrasileiro.hpg.ig.com.br)

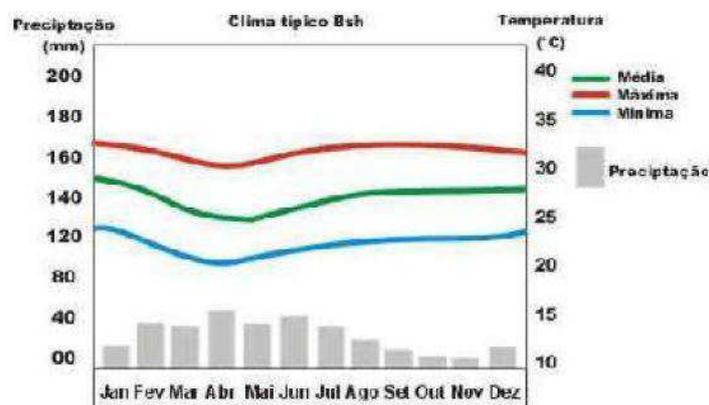


Figura 14. Regime de precipitação/temperatura na região Nordeste.
(Fonte: Climabrasileiro.hpg.ig.com.br)

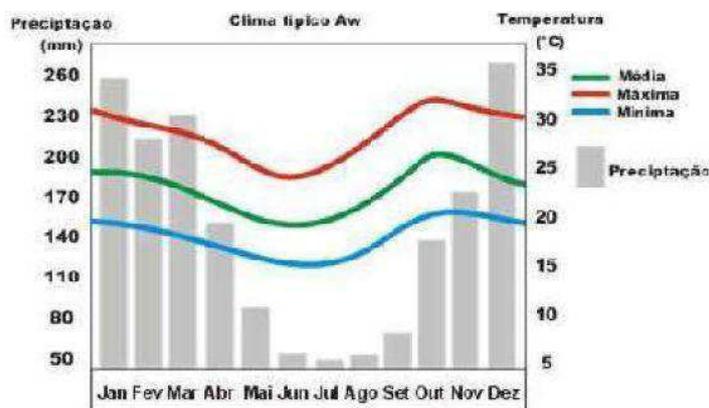


Figura 15. Regime de precipitação/temperatura na região Centro-Oeste.
(Fonte: Climabrasileiro.hpg.ig.com.br)

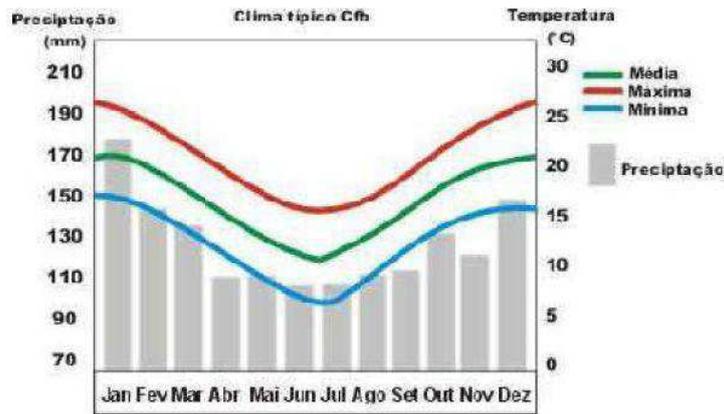


Figura 16. Regime de precipitação/temperatura na região Sul.
(Fonte: Climabrasileiro.hpg.ig.com.br)

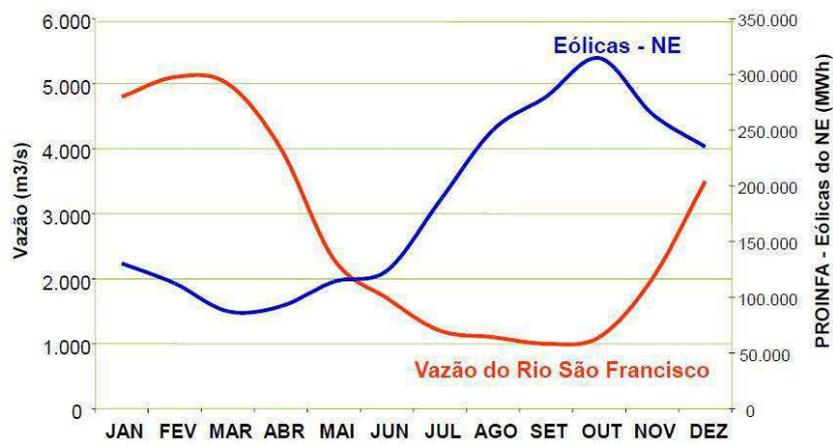


Figura 17. Sazonalidade das usinas eólicas do PROINFA no Nordeste.
(Fonte: Eletrobrás (2011))

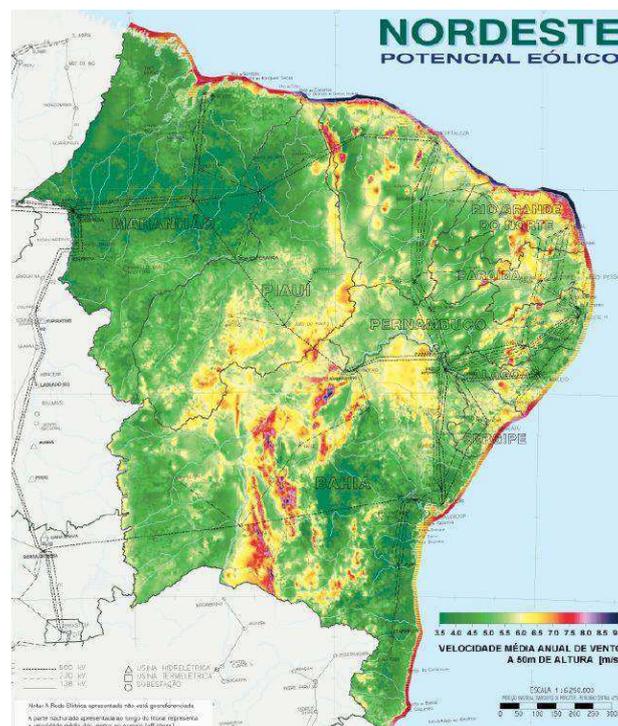


Figura 18. Mapa do potencial eólico do Nordeste
(Fonte: CRESESB).

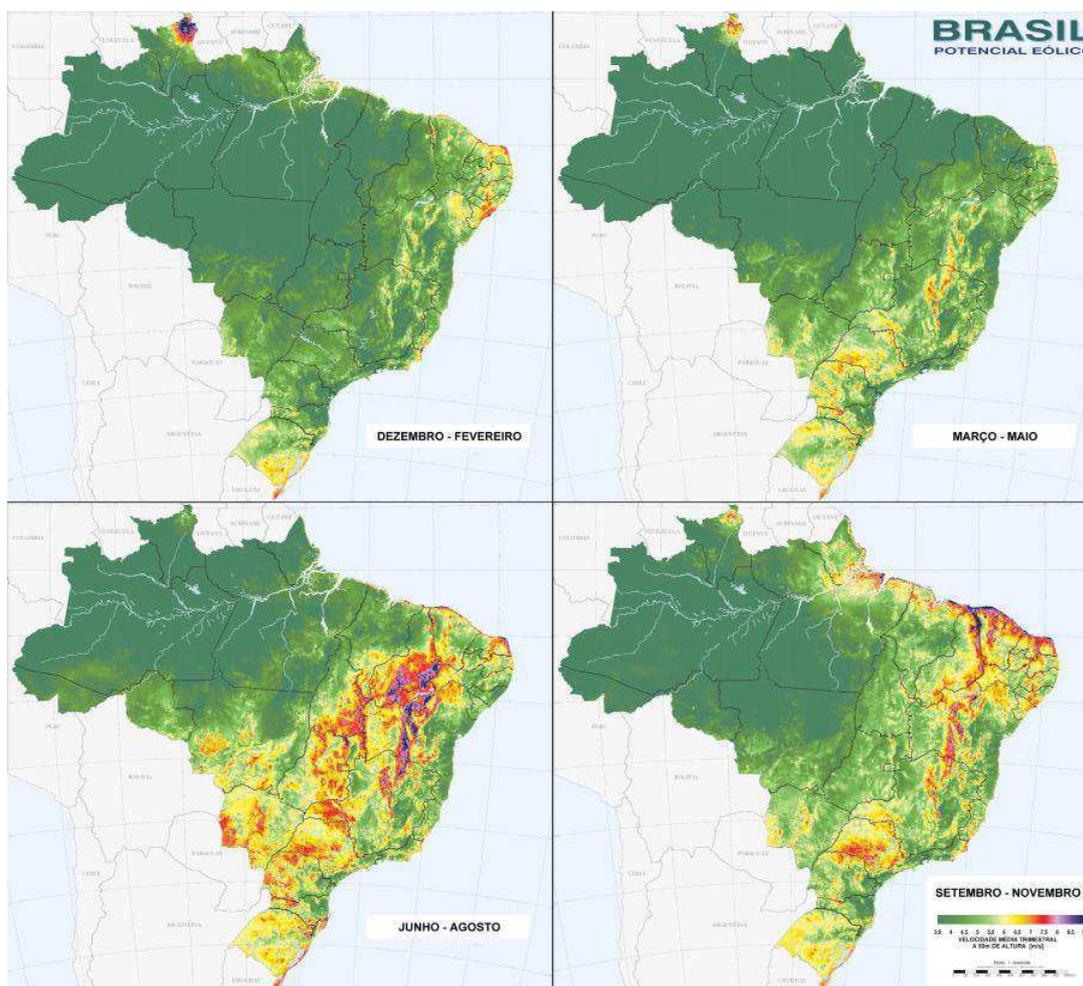


Figura 19. Condição trimestral do Brasil
(Fonte: CRESESB).

É possível verificar que o Nordeste apresenta amplas condições de aproveitamento da energia eólica, como uma fonte complementar a energia hidrelétrica. O excedente da produção pode ser armazenado nos reservatórios das usinas elétricas, para suprirem eventuais faltas hídricas.

3.2 USINAS EÓLICAS INSTALADAS NO BRASIL

As usinas e parques eólicos instalados no Brasil estão representados na Tabela 2, que identifica o nome do parque, a potência fiscalizada, o destino da energia, o proprietário do parque e o município no qual está instalado.

Tabela 2. Distribuição dos parques eólicos no Brasil (ANEEL, 2012).

Usinas do tipo Eólica em Operação				
Usina	Potência Fiscalizada (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município
Eólica de Prainha	10.000	PIE	100% para Wobben Wind Power Industria e Comércio Ltda	Aquiraz - CE
Eólica de Taíba	5.000	PIE	100% para Wobben Wind Power Industria e Comércio Ltda	São Gonçalo do Amarante - CE
Eólio - Elétrica de Palmas	2.500	PIE	100% para Copel Geração e Transmissão S.A.	Palmas - PR
Parque Eólico de Beberibe	25.600	PIE	100% para Eólica Beberibe S.A.	Beberibe - CE
Mucuripe	2.400	REG	100% para Wobben Wind Power Industria 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 II	29.700	PIE	100% para New Energy Options Geração de Energia S/A	Guamaré - RN
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 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 Icaraizinho	54.600	PIE	100% para Eólica Icaraizinho 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
Parque Eólico Elebrás Cidreira 1	70.000	PIE	100% para Elebrás Projetos S.A	Tramandaí - RS
Eólica Praias de Paraiuru	28.804	PIE	100% para Central Eólica Praia de Paraiuru 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

<u>Parque Eólico Sangradouro</u>	50.000	PIE	100% para <u>Ventos do Sul Energia S/A</u>	Osório - RS
<u>Parque Eólico de Palmares</u>	8.000	PIE	100% para <u>Parques Eólicos Palmares S.A.</u>	Palmares do Sul - RS
<u>Taiba Albatroz</u>	16.500	PIE	100% para <u>Bons Ventos Geradora de Energia S.A.</u>	São Gonçalo do Amarante - CE
<u>Parque Eólico dos Índios</u>	50.000	PIE	100% para <u>Ventos do Sul Energia S/A</u>	Osório - RS
<u>Bons Ventos</u>	50.000	PIE	100% para <u>Bons Ventos Geradora de Energia S.A.</u>	Aracati - CE
<u>Xavante</u>	4.950	PIE	100% para <u>Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.</u>	Pombos - PE
<u>Mandacaru</u>	4.950	PIE	100% para <u>Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.</u>	Gravatá - PE
<u>Santa Maria</u>	4.950	PIE	100% para <u>Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.</u>	Gravatá - PE
<u>Gravatá Fruitrade</u>	4.950	PIE	100% para <u>Eólica Gravatá - Geradora de Energia S.A.</u>	Gravatá - PE
<u>Millennium</u>	10.200	PIE	100% para <u>SPE Millennium Central Geradora Eólica S/A</u>	Mataraca - PB
<u>Pulpito</u>	30.000	PIE	100% para <u>Pulpito Energia Eólica S.A.</u>	Bom Jardim da Serra - SC
<u>Aquibatã</u>	30.000	PIE	100% para <u>Aquibatã Energia Eólica S.A.</u>	Água Doce - SC
<u>Santo Antônio</u>	3.000	PIE	100% para <u>Santo Antônio Energia Eólica S.A.</u>	Bom Jardim da Serra - SC
<u>Cascata</u>	6.000	PIE	100% para <u>Cascata Energia Eólica S.A.</u>	Água Doce - SC
<u>Rio do Ouro</u>	30.000	PIE	100% para <u>Rio de Ouro Energia Eólica S.A.</u>	Bom Jardim da Serra - SC
<u>Salto</u>	30.000	PIE	100% para <u>Salto Energia Eólica S.A.</u>	Água Doce - SC
<u>Bom Jardim</u>	30.000	PIE	100% para <u>Bom Jardim Energia Eólica S.A.</u>	Bom Jardim da Serra - SC
<u>Campo Belo</u>	10.500	PIE	100% para <u>Campo Belo Energia Eólica S.A.</u>	Água Doce - SC
<u>Amparo</u>	22.500	PIE	100% para <u>Amparo Energia Eólica S.A.</u>	Água Doce - SC
<u>Cruz Alta</u>	30.000	PIE	100% para <u>Cruz Alta Energia Eólica S.A.</u>	Água Doce - SC
<u>Vitória</u>	4.500	PIE	100% para <u>Cardus Energia Ltda.</u>	Mataraca - PB
<u>Presidente</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Camurim</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Albatroz</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Coelhos I</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Coelhos III</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Atlântica</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Caravela</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Coelhos II</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Coelhos IV</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Mataraca</u>	4.500	PIE	100% para <u>Vale dos Ventos Geradora Eólica S.A.</u>	Mataraca - PB
<u>Alhandra</u>	6.300	PIE	100% para <u>Cedin do Brasil Ltda</u>	Alhandra - PB
<u>Aratuá I</u>	14.400	PIE	100% para <u>Brasventos Aratuá 1 Geradora de Energia S.A.</u>	Guamaré - RN
<u>Mangue Seco 3</u>	26.000	PIE	100% para <u>Eólica Mangue Seco 3 – Geradora e Comercializadora de Energia Elétrica S.A.</u>	Guamaré - RN
<u>Macaúbas</u>	35.070	PIE	100% para <u>Macaúbas Energética S.A.</u>	Brotas de Macaúbas - BA

<u>Manque Seco 2</u>	26.000	PIE	100% para <u>Eólica Manque Seco 2 – Geradora e Comercializadora de Energia Elétrica S.A.</u>	Guamaré - RN
<u>Manque Seco 1</u>	26.000	PIE	100% para <u>Eólica Manque Seco 1 – Geradora e Comercializadora de Energia Elétrica S.A.</u>	Guamaré - RN
<u>Manque Seco 5</u>	26.000	PIE	100% para <u>Eólica Manque Seco 4 – Geradora e Comercializadora de Energia Elétrica S.A.</u>	Guamaré - RN
<u>Barra dos Coqueiros</u>	34.500	PIE	100% para <u>Energen Energias Renováveis S.A.</u>	Barra dos Coqueiros - SE
<u>Novo Horizonte</u>	30.060	PIE	100% para <u>Novo Horizonte Energética S.A.</u>	Brotas de Macaúbas - BA
<u>Seabra</u>	30.060	PIE	100% para <u>Seabra Energética S.A.</u>	Brotas de Macaúbas - BA
<u>Sangradouro 3</u>	24.000	PIE	100% para <u>Ventos da Lagoa S.A.</u>	Osório - RS
<u>Cabeço Preto</u>	19.800	PIE	100% para <u>Gestamp Eólica Baixa Verde S.A.</u>	João Câmara - RN
<u>Fazenda Rosário 3</u>	14.000	PIE	100% para <u>Parques Eólicos Palmares S.A.</u>	Palmares do Sul - RS
<u>Fazenda Rosário</u>	8.000	PIE	100% para <u>Parques Eólicos Palmares S.A.</u>	Palmares do Sul - RS
<u>Cerro Chato I (Antiga Coxilha Negra V)</u>	30.000	PIE	100% para <u>Eólica Cerro Chato I S.A.</u>	Santana do Livramento - RS
<u>Cerro Chato II (Antiga Coxilha Negra VI)</u>	30.000	PIE	100% para <u>Eólica Cerro Chato II S.A.</u>	Santana do Livramento - RS
<u>Cerro Chato III (Antiga Coxilha Negra VII)</u>	30.000	PIE	100% para <u>Eólica Cerro Chato III S.A.</u>	Santana do Livramento - RS
<u>IMT</u>	2,20	REG	100% para <u>Electra Power Geração de Energia Ltda</u>	Curitiba - PR
<u>Miassaba II</u>	14.400	PIE	100% para <u>MIASSABA GERADORA EÓLICA S.A.</u>	Guamaré - RN
<u>Cabeço Preto IV</u>	19.800	PIE	100% para <u>Gestamp Eólica Baixa Verde S.A.</u>	João Câmara - RN
<u>Ventos do Brejo A-6</u>	6	REG	100% para <u>Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis – CTGAS-ER</u>	Brejinho - RN
Total: 80 Usina(s)			Potência Total: 1.692.532,20 kW	

Tabela 3. Legenda da nomenclatura para designar o destino da energia.

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

Fonte: Banco de Informações de Geração

4 TENDÊNCIAS PARA O FUTURO

Devido à crise energética, a alternativa de utilização da energia eólica cresce cada vez mais, nos panoramas energéticos e no cenário mundial. Como pode ser visto na Figura 20 e na Figura 21, a geração de eletricidade através da fonte eólica têm apresentado um importante crescimento mundial, seguindo essa tendência, 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 o planeta, gerando aproximadamente 2 milhões de empregos e reduzindo a emissão de dióxido de carbono em mais de 10 bilhões de toneladas.

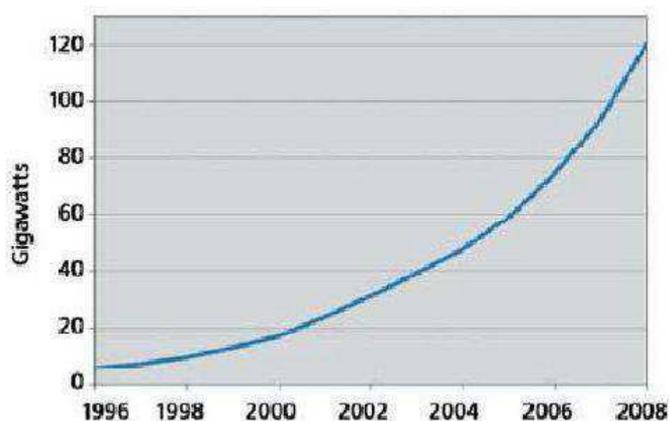


Figura 20. Potência eólica instalada no mundo, entre 1996 e 2008.

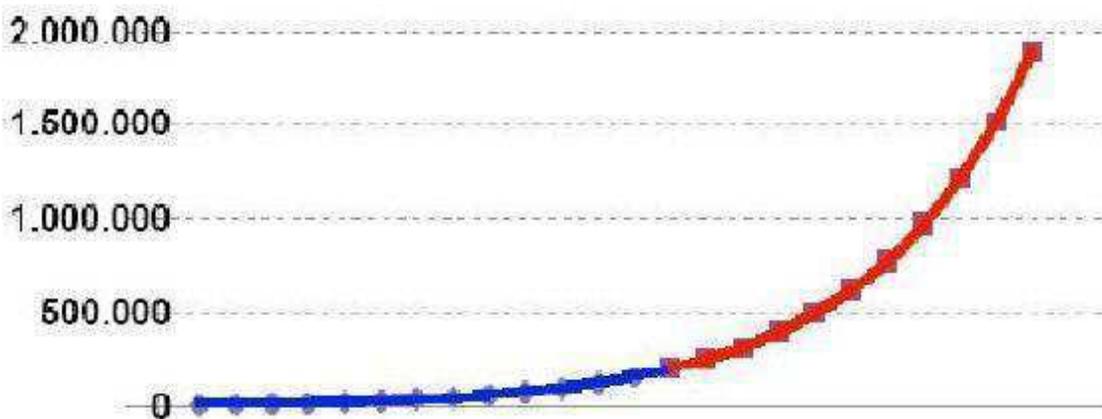


Figura 21. Tendência do crescimento eólico projetada até 2020 (WWEA, 2011).

4.1 TAMANHO DOS ROTORES

Com o aumento da utilização da energia eólica, vem a evolução dos aerogeradores e do tamanho dos rotores dos mesmos. O tamanho é bastante importante, pois, quanto maiores as pás das turbinas, mais energia pode ser capturada do vento e maior será a capacidade de geração de energia elétrica. De uma forma geral, dobrar o diâmetro do rotor quadruplica a geração de energia. Em alguns casos, em uma área de menor velocidade do vento, um rotor de menor diâmetro pode gerar mais energia que um de maior diâmetro. Isso ocorre porque uma estrutura menor consome menos energia mecânica do vento para acionar o gerador menor, de modo que a turbina pode operar a plena capacidade por mais tempo. A altura da torre também é um fator importante na geração de energia elétrica, quanto mais alta a torre, mais energia pode ser capturada, uma vez que diminui o atrito com o solo e objetos ao nível do solo, a velocidade do vento aumenta. Estima-se um aumento de 12% na velocidade do vento cada vez que se dobra a elevação da turbina.

A maioria das turbinas grandes tem sua potência máxima produzida com a velocidade do vento ao redor de 15 m/s. Considerando a velocidade do vento estável, o diâmetro do rotor é o fator determinante para quantidade de energia gerada por uma turbina. A altura da torre aumenta conforme o diâmetro da turbina aumenta, que ocasiona em maior acesso a ventos mais rápidos.

4.2 CUSTO DA ENERGIA EÓLICA

Ainda representando um desafio para a difusão da energia eólica, o custo de produção de energia eólica depende de fatores que influem no seu custo final. Atualmente, no mercado mundial, a instalação dos parques eólicos custam entre US\$ 1000 e US\$1400 por kW instalado. Esses valores podem ser alterados em função de:

- Tamanho;
- Capacidade;
- Distância;
- Topografia – Linhas de Transmissão

- Terreno;
- Transporte;
- Montagem;
- Mão-de-obra;
- Incentivos fiscais.

Há também o custo de geração, que varia em função da velocidade dos ventos, a remuneração no mercado internacional varia entre US\$ 35/MWh, para ventos maiores que 10 m/s, e US\$ 110/MWh para ventos menores que 5,5m/s, podendo sofrer alterações a depender dos incentivos fiscais do país.

O primeiro leilão brasileiro para contratação de energia elétrica gerada por energia eólica ocorreu em 2009, quando foram negociados 753 lotes de 1 MW ao preço médio de R\$ 148,39/MWh, com uma diferença de 21,49% em relação ao preço-teto estabelecido em edital, R\$ 189/MWh.

O segundo leilão brasileiro ocorreu em 2010. Foi realizado pela ANEEL e 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 2.289,2 MW de energia elétrica entre 89 usinas de fontes renováveis, 70% delas referentes a usinas eólicas. O preço da energia eólica negociada no leilão ficou em torno de R\$ 133,86/MWh.

5 ESTADO DA ARTE

O estado da arte é o nível mais alto do desenvolvimento de uma tecnologia, um aparelho ou uma área científica. É o ponto em que a tecnologia em questão deixa de ser um projeto técnico para se tornar um modelo, uma obra-prima.

O trabalho aqui relatado tem como objetivo mostrar a aplicabilidade, diversificação e inovações na área da energia eólica e a sua relação com as outras fontes de geração de energia elétrica.

5.1 EDIFÍCIOS AUTO-SUFICIENTES EM ENERGIA

Turbinas eólicas incorporadas em arranha-céus, essa foi a solução mais óbvia em países da península arábica, onde existem fortes ventos fluindo entre o Golfo Pérsico e o deserto. Quando se trata de edifícios com mais de 100m de altura, onde a velocidade do vento no topo tende a ser bem maior do que no solo, há um grande potencial para aproveitamento de energia eólica.

Desde abril de 2008 três turbinas unidirecionais de 29m de diâmetro giram entre as duas torres gêmeas de 240m e em forma elíptica 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 Atkins, o custo de até 30% do valor do projeto tornaria inviável a fabricação de turbinas em 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 que 3% do projeto.

O melhor para esse projeto seria que tivessem eixo vertical devido as vantagens de manutenção e também porque funcionam com vento vindo de todas as direções, sem

a necessidade de possuírem mecanismos como leme para colocarem as pás na direção dos ventos. Para resolver esse problema, 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 traseira do prédio, fato que acelera o vento entre as torres em até 30%, com também o desvia em um percurso em formato de “S” cujo centro permanece quase perpendicular à turbina, dentro de um azimute de 45°. Para ilustrar o que foi descritos, as Figura 22 e Figura 23 mostram as torres de Bahrain.



Figura 22. Vista frontal do BWTC.

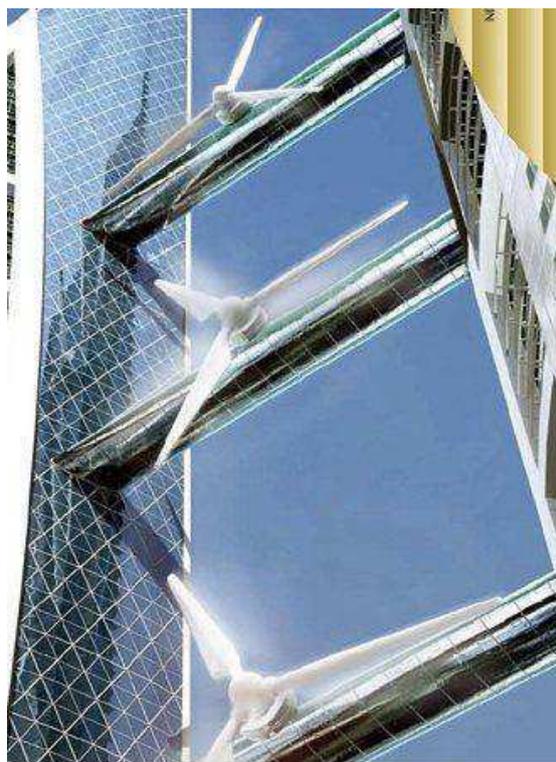


Figura 23. Vista dos 3 aerogeradores do BWTC.

5.2 SMART GRID

A maneira como a distribuição de energia elétrica é feita, na visão de muitos especialistas, é considerada arcaica, pois dependemos muito de uma única fonte geradora e caso ela falhe, toda a rede fica sem abastecimento. Por isso, uma nova proposta de criação de uma rede de energia inteligente, também conhecida como Smart Grid.

A lógica da Smart Grid esta baseada em “inteligência”, automatizando as redes atuais com medidores de qualidade e de consumo de energia em tempo real e sistemas de envio de dados, ou seja, estabelecer uma via de comunicação entre a geração de energia e o consumidor final, seja ele residencial ou empresarial. Em longo prazo, a ideia do Smart Grid prevê que os consumidores possam até gerar energia elétrica com a instalação de painéis solares e aerogeradores de pequeno porte.

O Smart Grid representa uma oportunidade sem precedentes para mover a indústria de energia elétrica para uma nova era de disponibilidade, confiabilidade e eficiência que vai contribuir positivamente para questões econômicas e ambientais. Durante o período de transição, será fundamental a realização de testes, melhorias tecnológicas, a educação do consumidor, desenvolvimento de normas e regulamentos e o compartilhamento de informações para assegurar que os benefícios previstos pelo smart grid se tornem realidade. Dentre os benefícios, pode-se destacar:

- Transmissão mais eficiente de energia;
- Restabelecimento mais rápido após um distúrbio na rede elétrica;
- Redução dos custos de operação e manutenção, que afeta diretamente o preço final que é repassado para o consumidor;
- Picos de demanda reduzidos, que também afetará o valor final da energia elétrica;
- Maior integração entre o sistema atual e o baseado em energia renovável;
- Maior segurança.

Hoje, quando há uma interrupção no fornecimento de energia elétrica, como um blecaute, uma série de serviços é afetada. Com a inclusão do smart grid, o sistema estará

melhor preparado para tais emergências, podendo redirecionar o circuito automaticamente após um surto na rede, isolando a falha juntamente com os equipamentos danificados ou defeituosos e acionando as fontes reservas.

Com o sistema integrado, uma das opções oferecidas pelo Smart Grid é de decidir quando for mais oportuno utilizar as fontes renováveis de energia, que no caso do nordeste, pode ser muito proveitoso, uma vez que o ápice da produção eólica coincide com a queda na geração das usinas hidrelétricas. A figura 24 mostra o sistema de comunicação entre geração e consumidores.



Figura 24. Sistema de comunicação idealizado no Smart Grid.

6 ESTUDO DE CASO

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

6.1 CASO GUAMARÉ

Um dos propósitos desse trabalho é apresentar a estrutura dos parques eólicos de Guamaré, cidade localizada a 160 km noroeste da cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte. São dois empreendimentos e ambos localizados 4 km ao norte da cidade de Guamaré (RN): Alegria I e Alegria II, totalizando 151,9 MW de potencia nominal instalada, Alegria será o maior parque eólico do país. Ocupando uma área total de cerca de 1.900 hectares, na Praia do Minhoto.



Figura 25. Vista do parque eólico Alegria I.

O empreendimento é uma iniciativa de New Energy Options Geração de Energia, uma empresa brasileira, controlada pelo grupo Multiner, sediado no Rio de Janeiro. O parque é composto por duas unidades, Alegria I e Alegria II. A unidade Alegria I é composta por 31 aerogeradores com potência nominal de 51,15 MW, que já se encontram em operação desde dezembro de 2010 e a energia gerada pelo mesmo esta sendo transmitida por uma linha de transmissão de 69 kV, com 3,5 km de extensão,

entre a subestação Alegria e a subestação Guimarães da COSERN. Na unidade Alegria II, serão instalados 61 aerogeradores, totalizando 100,65 MW. Após a energização da unidade Alegria II, a energia gerada será transmitida através da linha de transmissão de 230 kV, atualmente em construção, com extensão de 89 km entre a subestação Alegria e a Subestação Açu II, onde será entregue ao sistema interligado nacional. Os dois parques juntos têm capacidade para fornecer energia para aproximadamente 200 mil residências.



Figura 26. Vista do parque eólico Alegria I.

6.1.1 A EMPREENDEDORA E O INVESTIMENTO

A Multiner é uma empresa que tem o portfólio de geração de energia dentre os mais importantes do Brasil, o parque gerador planejado da Multiner envolve o desenvolvimento, montagem e operação de usinas hidrelétricas, termelétricas (a óleo e a gás) e eólicas localizadas nas principais regiões do país.

Empresa nacional do setor de geração de energia elétrica, a Multiner empregou mais de 450 trabalhadores na construção do parque eólico Alegria I que opera com 31 aerogeradores da fabricante dinamarquesa Vestas, que tem grande reconhecimento no mercado mundial. A escolha da localização é altamente estratégica, já que a Região Nordeste apresenta excelente regime de ventos.

A Companhia tem como visão, atuar nas principais regiões do país que tenham bom potencial para investimentos em energia, bem como a geração energia elétrica por meio de várias fontes, tais como: hidráulica, eólica e térmica.

No ramo da energia eólica, destaca-se o Parque Eólico Alegria, localizado no município de Guimarães, no Rio Grande do Norte, com capacidade nominal total de

151,9 MW. O parque é composto pelas Usinas de Energia Eólica Alegria I e Alegria II. O parque eólico Alegria I possui capacidade instalada de 51,15 MW e iniciou operação comercial em dezembro de 2010. O parque eólico Alegria II, atualmente em construção, terá capacidade instalada de 100,65 MW.

A Multiner possui uma Usina Termelétrica já em operação: a Usina Termelétrica Cristiano Rocha, operada pela RAESA, Rio Amazonas Energia S.A., e localizada em Manaus. A Usina Termelétrica Cristiano Rocha tem 85,4 MW de capacidade nominal. Em operação desde novembro de 2006, a usina gera energia a base de óleo combustível de forma continuada para a distribuidora de energia elétrica local da Eletrobrás: a Amazonas Distribuidora de Energia S.A. (antiga Manaus Energia). Atualmente, a usina está sendo convertida para o gás natural.

O parque terá investimentos na ordem de R\$ 820 milhões e conta com o maior financiamento já realizado pelo Banco do Nordeste do Brasil (BNB), no valor de R\$ 650 milhões, dividido em duas partes. A primeira foi destinada à unidade Alegria I e soma R\$ 250 milhões, enquanto que a segunda está em fase final de contratação e beira R\$ 400 milhões.

6.1.2 LEIAUTE DO PARQUE

Quando as pás da turbina absorvem parte da energia cinética dos ventos, o mesmo tem a sua velocidade reduzida, gerando um vórtice cônico que cresce atrás da turbina e que, após certa distância retoma sua velocidade original. Conhecido como efeito esteira (Figura 27), esse é um dos fatores que deve ser levado em consideração quando se projeta um parque eólico.

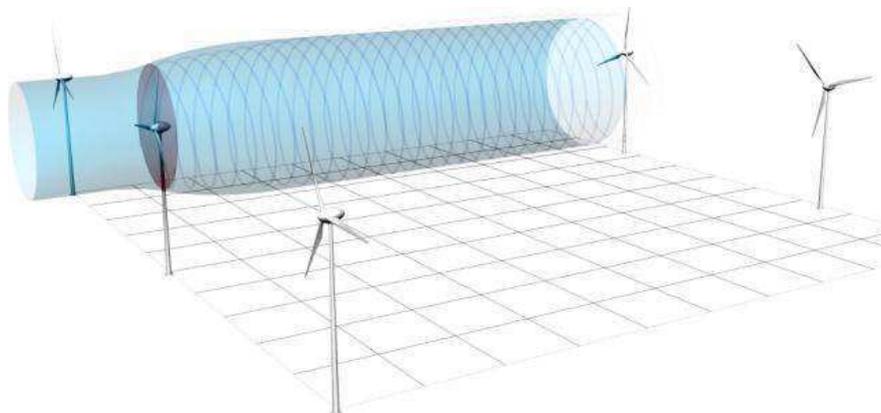


Figura 27. Efeito Esteira.
(Fonte: mapa eólico RN)

A distribuição das turbinas deve ser de tal forma que reduza ao máximo esse efeito que pode causar turbulência nas turbinas seguintes e também danificar as pás do rotor. Para calcular essa distância segura, diversos fatores são levados em consideração, como a rugosidade do terreno, o diâmetro do rotor e a complexidade do terreno. A figura 28 mostra um exemplo de leiaute para um parque eólico, utilizando como parâmetro de distância o diâmetro do rotor (D).

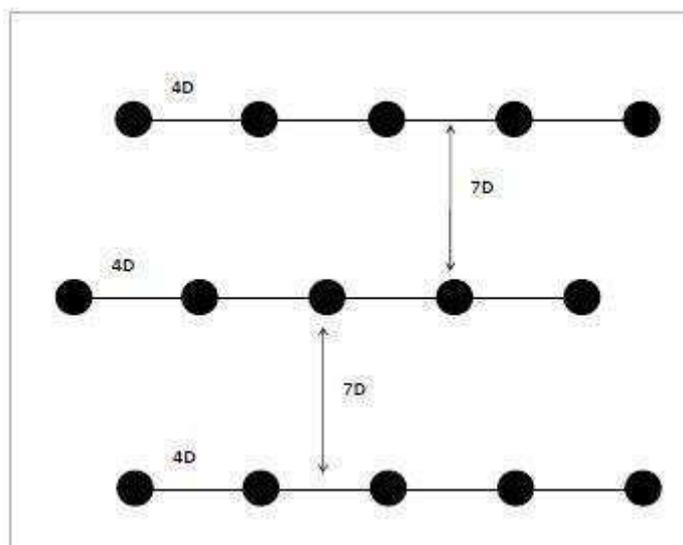


Figura 28. Modelo de distribuição de turbinas em um parque eólico.
(Fonte: The Wind Farm Layout Optimization Problem)

No leiaute do parque eólico Alegria I, conseguido por imagens via satélite, Figura 29 e 30, a distância mínima encontrada entre as torres, foi de aproximadamente 250 metros, que está ligeiramente abaixo dos $4D$ propostos pelos estudos.

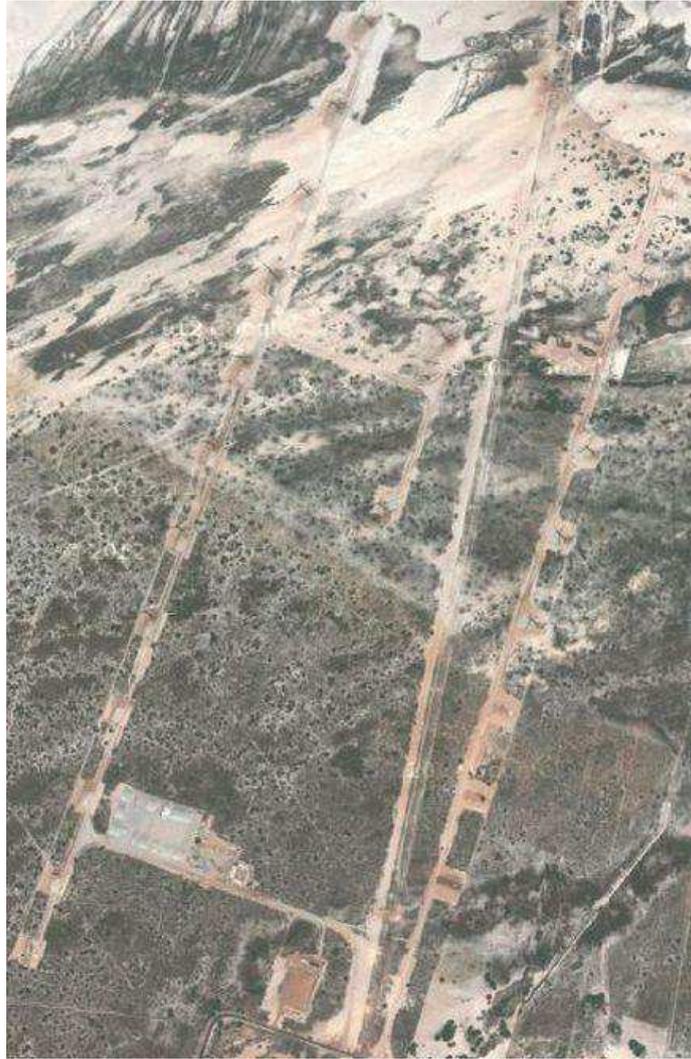


Figura 29. Leiaute do Parque Eólico Alegria I.
(Fonte: Google Maps)



Figura 30. Leiaute do Parque Eólico Alegria I.
(Fonte: Google Maps)

Durante as pesquisas, tivemos acesso a uma descrição de projeto do parque eólico Alegria, proveniente da fabricante Fuhrlander, que em sua proposta de projeto, utilizaria 60 turbinas com potência nominal de 2,5 MW, ao invés das 92 turbinas com

potência nominal de 1,65 MW da Vestas. Na figura 31 pode ser visto o layout proposto pela Fuhrlander.

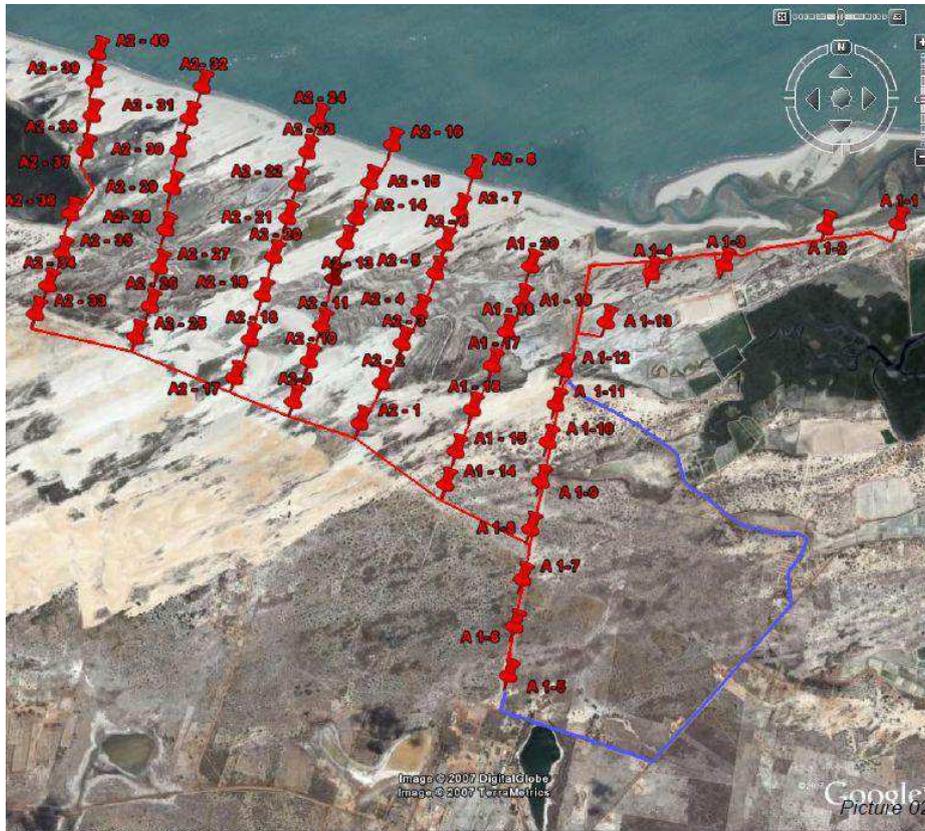


Figura 31. Leiaute do Parque Eólico Alegria.
(Fonte: Descrição do Projeto - Fuhrlander)

Por fim, a projeção do parque eólico Alegria I e II, com a localização das estruturas do Alegria I e da área onde será instalado o Alegria II.



Figura 32. Leiaute do Parque Eólico Alegria.

6.1.3 MONTAGEM DAS ESTRUTURAS

O parque está sendo implantado numa área litorânea de relevo regular, para o início das obras, foi feito a terraplanagem, e depois a fundação dos geradores, constituída de um bloco cilíndrico de concreto armado, com 300 m³, construído sobre 16 estacas do tipo hélice contínua, com 12 metros de profundidade. Na Figura 33 é possível ver a base da torre.



Figura 33. Base do aerogerador.

O aterramento das bases para a instalação das torres de sustentação, que tem 70 m de altura e são afixadas nas bases de concreto armado, são executadas em módulos, chamados de tramos, fixados uns sobre os outros.



Figura 34. Içamento e encaixe do segundo tramo.

Sob a superfície do primeiro tramo são montados os painéis internos de monitoramento e controle das funções do aerogerador. O sistema garante o bom funcionamento do aerogerador, independente da velocidade do vento, monitorando os dados coletados pelos sensores do mesmo.

Concomitante ao processo de montagem da torre, uma segunda equipe monta o hub do aerogerador, permitindo que o aerogerador seja instalado assim que a torre esteja finalizada. Com a torre montada, é possível instalar a nacele, componente que comporta todos os mecanismos do gerador, formado pela caixa multiplicadora, freios, embreagem, mancais, controle eletrônico e sistema hidráulico. Por fim, a instalação das pás do rotor.

6.1.4 MODELO DE AEROGERADOR UTILIZADO

O modelo utilizado nos parques é o Vestas V82-165, modelo em que a maioria dos componentes não são fabricados pela própria Vestas e sim comprados de fornecedores menores. O rotor, com 82 m de diâmetro, peso de aproximadamente 42 t, pás compostas por madeira, fibra de carbono e fibra de vidro reforçada com epóxi, utiliza um gerador assíncrono, com resfriamento a água, 1,65 MW de potência nominal e trabalha com 690/600 V entre fases pra as frequências de 50/60 Hz. Esse modelo foi o utilizado nas 92 estruturas dos dois parques, 31 no Alegria I e 61 no Alegria II.



Figura 35. Aerogerador Vestas V82-165

Possui rotor com controle ativo de ângulo de passo das pás de frente para o vento, sentido horário de rotação, com proteção total contra descargas atmosféricas,

velocidade nominal do rotor é de 14,4 rpm, velocidade para início de geração de energia é de 3,5 m/s, 13 m/s para a potência nominal e a velocidade para corte de produção é de 20 m/s.

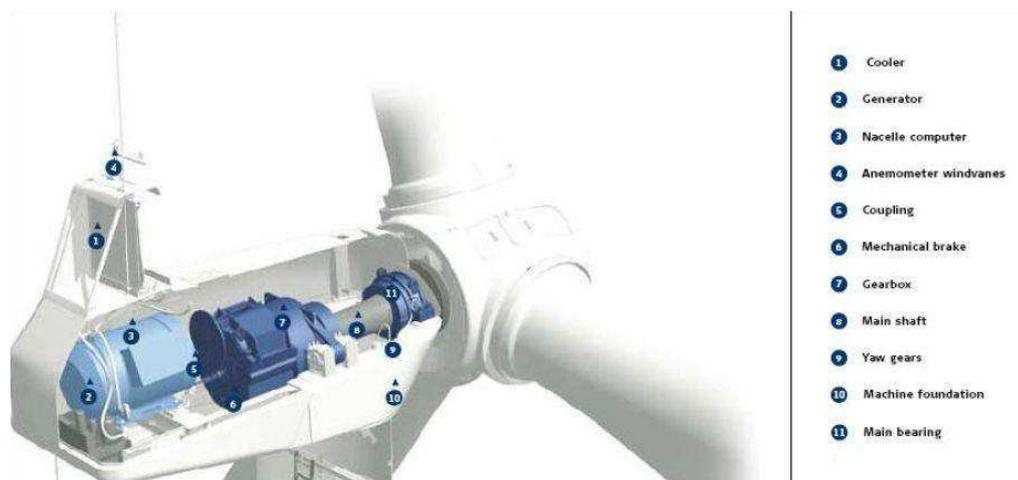


Figura 36. Corte lateral da turbina.

Também possui controle completo de ângulo de passo, com 3 cilindros hidráulicos, transmissão do tipo planetária, altura do hub de aproximadamente 70 m, para 60Hz. A nacelle é basicamente composta por fibra de vidro, polietileno e estireno, pesando aproximadamente 52 t, com todos os componentes. Nas figuras a seguir, é possível analisar os gráficos de potência e coeficiente de potência em relação à velocidade do vento.

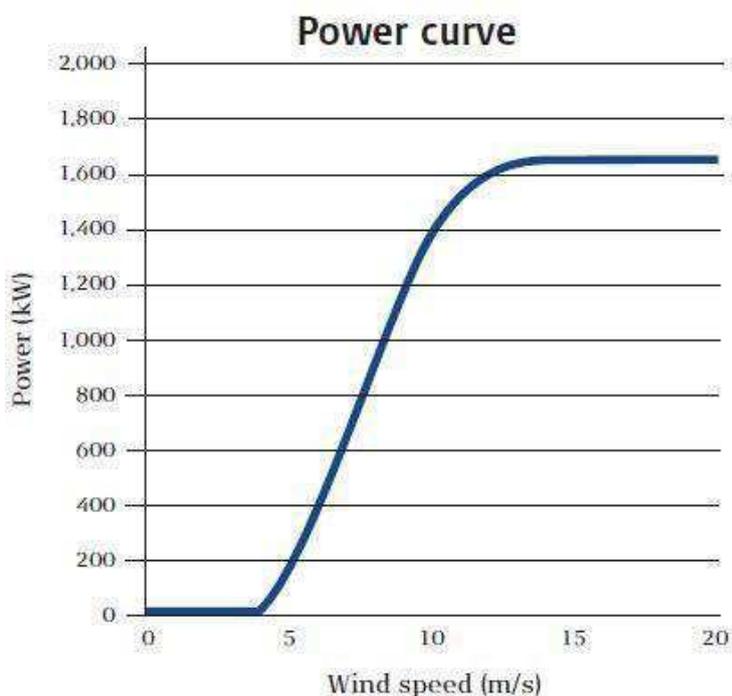


Figura 37. Curva de potência em relação a velocidade do vento.

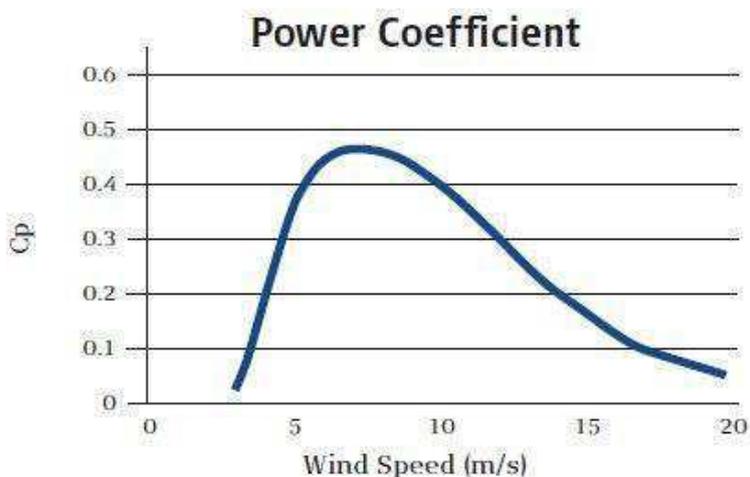


Figura 38. Curva de coeficiente de potência em relação a velocidade do vento.

Como pode ser analisado a partir das figuras 37 e 38, o coeficiente de potência que será aplicado na capacidade de geração da turbina ficará entre 0.40 e 0.45, visto que a velocidade média do vento na região de Guamaré está entre 8 e 9 m/s, velocidade que está abaixo da velocidade nominal da turbina Vestas V82-165, reduzindo a capacidade geração da turbina para menos que 50% da capacidade nominal.

6.1.5 INTEGRAÇÃO À LINHA DE TRANSMISSÃO

A linha de transmissão de 230 kV, que interligará a subestação do parque eólico alegria e a subestação de Açu II, de propriedade da Companhia Hidrelétrica do Vale do São Francisco (CHESF), está sendo implantada na região centro-norte do estado do Rio Grande do Norte. Com 89 km de extensão, atravessando os municípios de Guamaré, Macau, Pendências, Alto do Rodrigues, Afonso Bezerra, Ipanguaçu, Itajaí e Assu. Para a linha em questão, foram utilizadas 184 torres, divididas entre estruturas estaiadas e autoportantes, faixa de servidão com 20m de largura e extensão de aproximadamente 89 km.

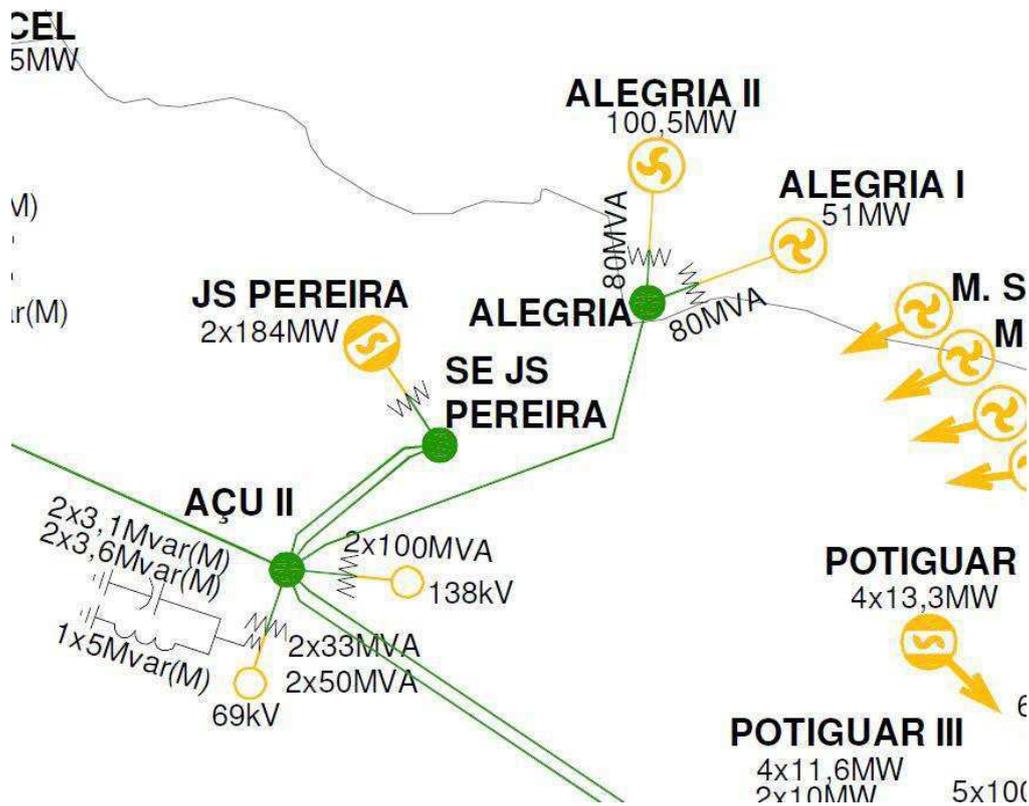


Figura 39. Integração do parque eólico a rede elétrica do Rio Grande do Norte.

6.1.6 MAPEAMENTO DO POTENCIAL EÓLICO DO RIO GRANDE DO NORTE

O potencial eólico do Rio Grande do Norte foi calculado a partir das medições anemométricas, interpoladas para todo o território através de modelamento de mesoescala (MesoMap) e simulações. Os resultados gerados mostram os principais parâmetros estatísticos da velocidade e direção dos ventos ao longo do estado, bem como seus regimes diurnos e sazonais.

O MesoMap é um conjunto integrado de modelos de simulação atmosférica, bases de dados meteorológicos e geográficos, redes de computadores e sistemas de armazenamento. O sistema foi desenvolvido nos Estados Unidos pela TrueWind Solutions, além do projeto piloto do mapeamento do estado de Nova York, o sistema foi utilizado em projetos similares nas Américas, Europa e Ásia.

Por fim, o MesoMap simula diretamente os regimes de vento de longo prazo, eliminando a incerteza intrínseca de ajustes climatológicos baseados em correlações de registros de vento de curto e longo prazo, obtidos por medições em terreno.

Para as medições anemométricas, o mapeamento do Rio Grande do Norte contou com uma rede de 8 torres anemométricas durante 16 meses de medições. As torres

foram instaladas em locais rigorosamente selecionados, baseado em fatores como baixa rugosidade do terreno e afastamento de obstáculos. Para a escolha das regiões representativas do estado, foi realizado um mapeamento eólico preliminar de todo o estado, que destacou as melhores áreas para instalação das torres anemométricas a Figura 40 mostra a localização das torres anemômetros.

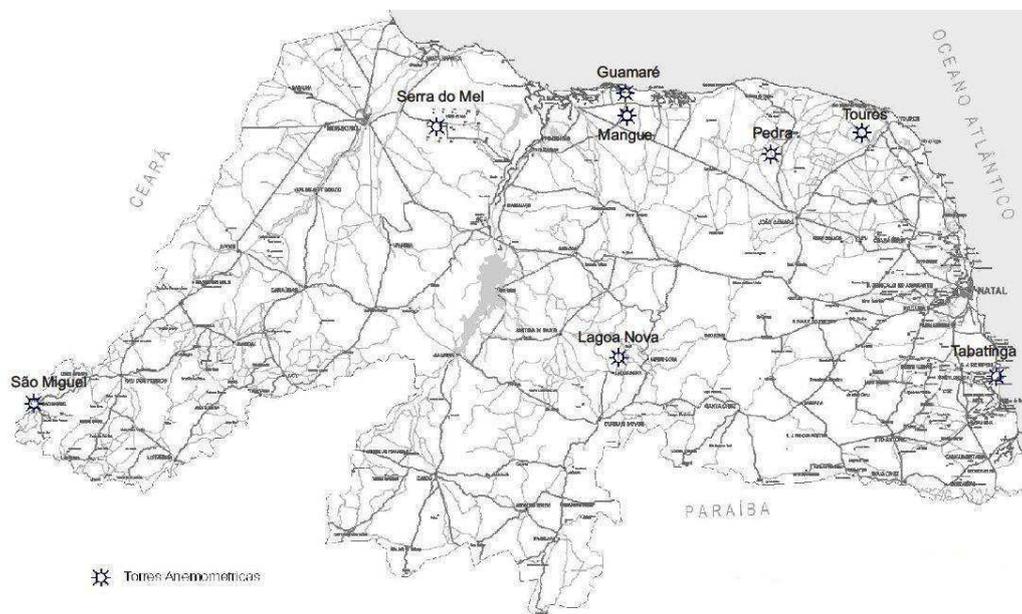


Figura 40. Localização das torres anemométricas (COSERN).

Estas áreas foram inspecionadas, definindo-se a posição definitiva das torres com o auxílio de GPS, imagens de satélite, modelos de topografia e mapa eólico preliminar. Foram instaladas 4 torres ao longo do litoral norte, as estações Guararé, Mangue, Tabatinga e Touros, e 4 torres no interior, as estações Serra do Mel, São Miguel, Lagoa Nova e Pedra.



Figura 41. Detalhe da torre anemométrica (COSERN).

As torres, com 50 metros de altura, foram equipadas com anemômetros em dois níveis (30 e 48 m) e um sensor de direção a 48 m de altura. Foram utilizados anemômetros com padrão de qualidade internacional, utilizados frequentemente em projetos de usinas e parques eólicos. Em cada torre, um comunicador de satélite e um sistema de integração entre os sistemas de comunicação e medição.



Figura 42. Torre de monitoramento anemométrico de 50 metros de altura (COSERN).

Em cada período de medição são registrados histogramas de velocidade e as velocidades médias e máximas nas duas alturas ajustadas para medição, frequência de

ocorrência e velocidades médias por direção, frequência de calmarias e velocidades médias horárias (regime diurno). Na figura 43, são apresentados dados estatísticos referentes ao primeiro mês de medição.

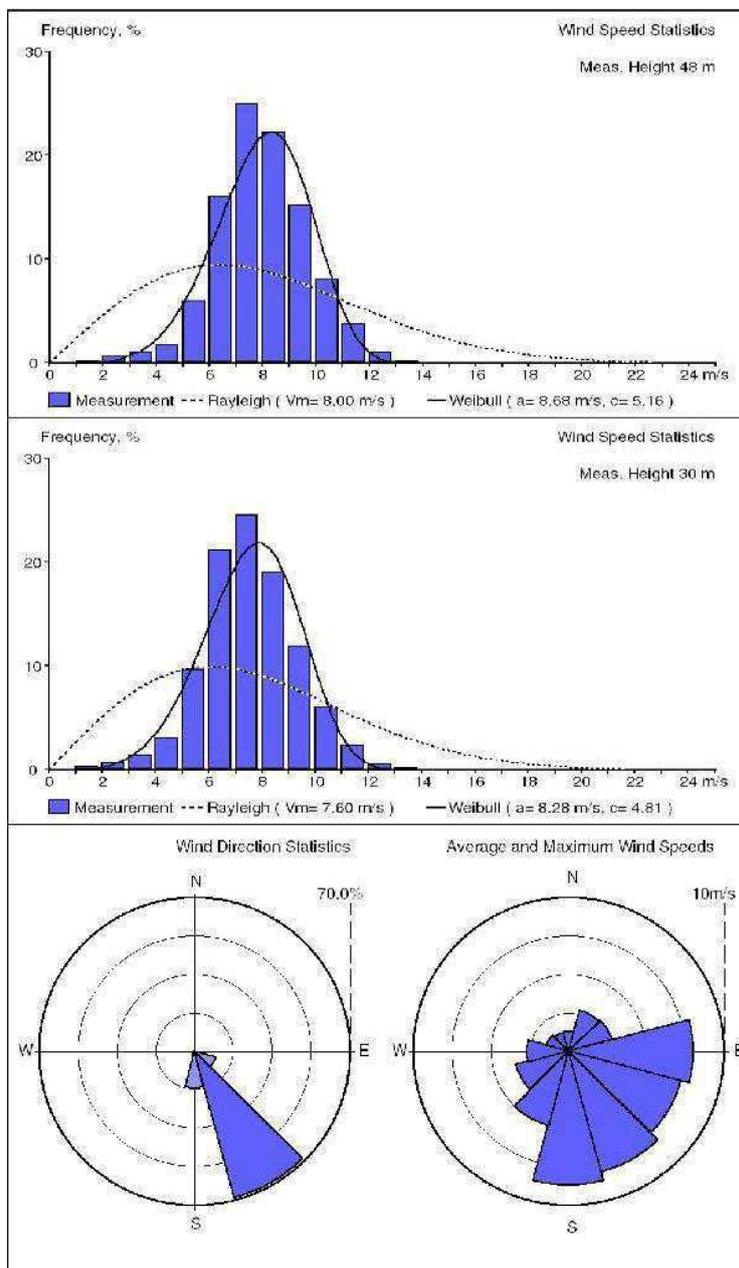


Figura 43. Estatísticas apresentadas pelo sistema de armazenamento da torre anemométrica (COSERN).

Os dados coletados pelas torres foram auditados utilizando rotinas e algoritmos de validação e verificação, de modo a excluírem-se possíveis falhas ou incoerências das medições. Após os testes de validação, os resultados suspeitos ou ausentes foram devidamente tratados e analisados. Por fim, os dados resultantes foram agrupados e

consolidados no modelo atmosférico utilizado no mapeamento do potencial eólico do estado do Rio Grande do Norte.

6.1.7 POTENCIAL EÓLICO DO RIO GRANDE DO NORTE

O mapeamento do potencial eólico do Rio Grande do Norte demonstrou áreas com um grande potencial para empreendimentos eólio-elétricos no estado, dentre essas áreas, três se destacam apresentando maior potencial.

O nordeste do estado é uma área extensa e bastante promissora para desenvolvimento de aproveitamento eólico, com velocidades médias anuais entre 8,0 e 9,0 m/s, a 75 m de altura, nas melhores áreas. O sistema elétrico apresenta linhas de transmissão de 69 kV, que interligam as principais cidades à capital, Natal. Área com potencial para grandes usinas eólicas, necessárias para diluir os custos da interligação do sistema elétrico regional. Dentro dessa área, temos cidades como Parnamirim, Extremoz, São Gonçalo do Amarante, Ceará-Mirim, Touros, João Câmara, Taipu, Caiçara do Norte e São Bento do Norte.

A região situada no litoral norte do estado apresenta velocidades médias anuais acima de 8,0 m/s, a 75m de altura, nas melhores áreas. O sistema elétrico tem linhas de transmissão de 69 kV e uma linha de 230 kV que interliga Açu e Mossoró. Os principais centros de consumo dessa região são Mossoró, Macau, Areia Branca, Grossos e Guamaré, onde está localizado o parque eólico Alegria, estudado nesse trabalho.

A região das Serras Centrais possui uma grande elevação, situada a 700m acima do nível do mar, possui boas características para aproveitamento de energia eólica, com velocidades médias anuais entre 7,5 m/s e 8 m/s, a 75 m de altura, nas melhores áreas. O sistema elétrico apresenta linhas de transmissão de 69 kV e uma linha de 138 kV, que interliga as cidades de Santana do Matos e Currais Novos. As principais cidades dentro dessa região são Currais Novos, Parelhas, Jardim do Seridó, Acari, Santana do Matos, Cerro Cora e Lagoa Nova.

O potencial eólico do estado foi calculado a partir da integração dos mapas de velocidades anuais, utilizando recursos de geoprocessamento, cálculos de desempenho e considerações relativas à velocidade dos ventos nas diversas alturas comparadas com o potencial de geração das usinas eólicas no estado da arte mundial. Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4.. Potencial de Geração eólica.

INTEGRAÇÃO POR FAIXAS DE VELOCIDADE						INTEGRAÇÃO CUMULATIVA			
ALTURA [m]	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	FATOR DE CAPACIDADE	ENERGIA ANUAL [GWh]	VENTO [m/s]	ÁREA [km ²]	POTÊNCIA INSTALÁVEL [MW]	ENERGIA ANUAL [GWh]
50	6.0-6.5	9934	14901	0.206	26900	≥ 6.0	24085	36127	82285
	6.5-7.0	7776	11665	0.264	26930	≥ 6.5	14151	21227	55385
	7.0-7.5	4425	6638	0.320	18615	≥ 7.0	6375	9562	28455
	7.5-8.0	1546	2319	0.372	7563	≥ 7.5	1950	2925	9840
	8.0-8.5	305	458	0.415	1664	≥ 8.0	404	606	2277
	≥ 8.5	99	149	0.471	613	≥ 8.5	99	149	613
75	6.0-6.5	9892	14838	0.187	24271	≥ 6.0	31770	47655	108031
	6.5-7.0	8924	13386	0.238	27860	≥ 6.5	21878	32817	83761
	7.0-7.5	7488	11233	0.297	29247	≥ 7.0	12954	19431	55901
	7.5-8.0	3843	5765	0.354	17877	≥ 7.5	5465	8198	26654
	8.0-8.5	1316	1973	0.403	6963	≥ 8.0	1622	2434	8776
	≥ 8.5	307	460	0.450	1813	≥ 8.5	307	460	1813
100	6.0-6.5	9751	14627	0.155	19849	≥ 6.0	36924	55385	112681
	6.5-7.0	9119	13678	0.196	23539	≥ 6.5	27172	40758	92832
	7.0-7.5	7685	11528	0.248	25042	≥ 7.0	18053	27080	69293
	7.5-8.0	6673	10010	0.301	26395	≥ 7.5	10368	15552	44251
	8.0-8.5	2732	4098	0.355	12741	≥ 8.0	3695	5543	17857
	≥ 8.5	963	1444	0.404	5116	≥ 8.5	963	1444	5116

O potencial de geração eólica do Rio Grande do Norte é grande, na faixa dos 15 GW a 75 m de altura com ventos superiores a 7,0 m/s e esta sendo aproveitado gradativamente com a instalação de diversos parques eólicos, como o parque eólico Alegria.

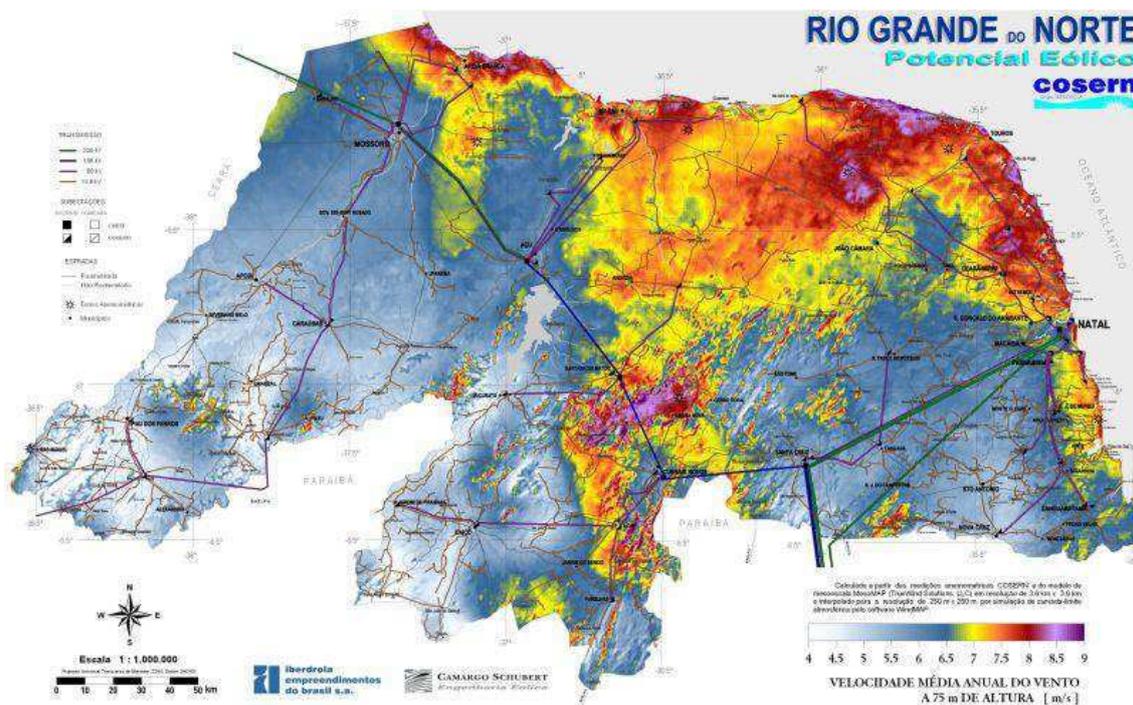


Figura 44. Velocidade média anual dos ventos a 75m de altura (COSERN).

7 CONCLUSÃO

Este estudo teve como foco principal apresentar as noções básicas de funcionamento de um parque de energia eólica e a sua conversão em energia elétrica, assim como apresentar as tecnologias empregadas nos modelos de turbinas eólicas.

Conclui-se a partir da análise do potencial eólico brasileiro que, existe um bom potencial para geração de energia elétrica que não é aproveitado, com destaque para o potencial de 75 GW do nordeste brasileiro. Toda forma de energia limpa é bem vinda, mas cada região tem sua forma de adaptação aos recursos. Além disso, a energia proveniente dos ventos gera boas expectativas para o futuro, se houver a integração dos sistemas, com o auxílio de novas tecnologias, como o smart grid.

Conclui-se que é imprescindível para o Brasil investir no potencial eólico da região nordeste, com a construção dos parques eólicos, suprimindo a deficiência proveniente dos períodos de baixa hídrica e também complementando a rede elétrica atual, possibilitando o crescimento econômico e tecnológico da região.

É notável que é imprescindível que se realizem estudos mais consistentes de levantamento de velocidades e condições de vento para localizar as turbinas nos parques eólicos e que se disponibilize os dados técnicos de medições da velocidade dos ventos, assim como dados mais consistentes sobre as turbinas eólicas e seus componentes. Durante a elaboração desse trabalho, encontramos dificuldades em obter informações consistentes sobre os componentes das turbinas, um exemplo que pode ser citado é o do gerador utilizado pela turbina Vestas V82-165 que foi descrito da seguinte forma: o gerador consiste principalmente de aço e cobre.

Esse trabalho e minha vivência empírica me deixaram a sensação de que existe uma grande preocupação em falar sobre potência instalada ao invés de potência gerada, que é de fato, o que o parque será capaz de nos fornecer.

Pretende-se que esse estudo preliminar (TCC) colabore com o melhor entendimento dos aproveitamentos eólicos ensejando a produção científica, incentivando a produção de outros trabalhos na área de energia eólica, possibilitando discussões e reflexões por parte dos estudantes e profissionais visando à modernização e a integração de novas tecnologias tanto no que diz respeito à construção de novos parques eólicos como na rede elétrica nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT. (2003). NBR 6028 - Informação e documentação - Resumo - Apresentação. (p. 2). Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT. (30 de 12 de 2005). NBR 14724 - Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos — Apresentação. *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 9). ABNT.
- Banco de informações de Geração*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=7&ger=Outros&principal=E%C3%B3lica>
- Carvalho, P. (2003). *Geração Eólica*. Fortaleza - CE: Imprensa Universitária.
- Centro de Referencia Para Energia Eólica e Solar*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/>
- Hirata, M. H., & Regina, M. A. (2000). *Os ventos: Origens e Mecanismos*. Rio de Janeiro - RJ.
- IEEE. (Setembro de 2011). IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads. *IEEE Standard 2030-2011*, 1 - 126.
- Lopez, R. A. (2002). *Energia Eólica*. São Paulo - SP: Editora Artliber.
- Multiner*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.multiner.com.br/multiner/Default.aspx?TabId=123>
- Parque Eólico Alegria*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.parqueeolicoalegria.com.br>
- Revista Techne*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em www.revistatechne.com.br
- Samorani, M. (2010). The Wind Farm Layout Optimization problem.
- Smart Grid Information Clearing House*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.sgiclearinghouse.org/LearnMore>
- SmartGrid*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.smartgrid.gov/>
- Stiebler, M. (2008). *Wind Energy Systems for Electric Power Generation*. New York: Ed. Springer.
- Vestas Wind Energy*. (s.d.). Acesso em Setembro de 2012, disponível em <http://www.vestas.com/>