



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

TIAGO DA SILVA BALBINO

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:  
UM ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO NACIONAL**

Campina Grande, Paraíba  
Abril de 2014

TIAGO DA SILVA BALBINO

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:  
UM ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO NACIONAL**

*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: Geração de Energia

Orientador:

Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2014

TIAGO DA SILVA BALBINO

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA:  
UM ESTUDO DO POTENCIAL EÓLICO NACIONAL**

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: Geração de Energia Eólica

Aprovado em        /        /

**Prof. Leimar de Oliveira, M.Sc, UFCG**  
Orientador

**Professor Avaliador**  
Componente da Banca

Dedico este trabalho a minha mãe e minha tia-mãe que me apoiaram de todas as formas na realização dos meus sonhos.

À minha amada namorada que me acompanha nesta caminhada.

À memória do meu pai, do meu avô e de minha tia, que continuam a reger minha vida de outro plano.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos em minha vida e por estar sempre ao meu lado e ao de minhas mães guiando e iluminando os caminhos dessa nossa jornada.

A realização deste trabalho seria inimaginável se não fosse o carinho, a abnegação e o empenho principalmente de minha mãe, Raimunda da Silva Balbino, e de minha tia-mãe, Josefa Pereira da Silva, que nunca mediram esforços na construção de minha educação e do meu caráter e na realização dos meus sonhos, sempre trilhando comigo o caminho que me leva à ampliação dos conhecimentos.

Quero, também, formular os meus sinceros agradecimentos ao Professor M. Sc. Leimar de Oliveira que, além de orientar, foi um companheiro e amigo, que disponibilizou o seu extraordinário conhecimento, estimado senso de humor e paciência infinita para auxiliar na formação da estrutura e execução deste trabalho.

Agradecimento especial, repleto de muito amor e carinho, para minha namorada Layana Dantas de Alencar, que esteve ao meu lado, apoiando e estimulando para a conclusão de mais esta etapa de nosso caminho.

Aos irmãos de república, Eng. Alberto Henrique Dantas, Eng. Luiz Carlos Queiroga Junior e M. Sc. Miguel Queiroga Filho, que partilham comigo, desde longas datas, momentos de alegrias, infortúnios, afazeres, superações e conquistas vivenciadas não apenas ao logo de nossas vidas acadêmica, mas também antes e depois.

Aos companheiros, amigos de batalha e futuros colegas de profissão, Eng. Cláudio Moreira de Lima, Eng. José de Sousa Lima Junnior, Eng. Fausto Vilar Gonçalves, Eng. Francisco Luiz de Oliveira Júnior, Eng. Luciano Duarte Medeiros e Eng. Wallysson de Vasconcelos Sousa, que trilham comigo esta longa jornada, tornando os momentos de adversidades e afazeres em inestimáveis histórias de superações e alegrias.

Aos meus amigos que, de alguma forma, fizeram-se presentes e que me ajudaram a seguir em frente, em especial, João Raimundo Pereira Neto e Layz Dantas de Alencar.

Finalmente, uma vida se constrói com a soma de todos os momentos vividos. São inúmeros os professores e companheiros que contribuíram de forma singular ao longo de minha existência para a pessoa que sou hoje, em todos os ângulos considerados. A todos, meu muito obrigado.

*“Quando os ventos de mudança sopram,  
umas pessoas levantam barreiras, outras  
constroem moinhos de vento.”*

Érico Veríssimo

## RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo da energia eólica no Brasil, expondo as características estimadas dos recursos eólicos de cada uma das cinco regiões nacionais, por meio de pesquisa bibliográfica com base em livros, artigos científicos, periódicos indexados e materiais disponibilizados pelos principais órgãos e instituições responsáveis pelo setor elétrico brasileiro, impressos ou em formato digital. *A priori*, será feita uma explanação geral acerca dos princípios da energia eólica, mostrando a origem dos ventos e os fatores que influenciam o seu comportamento, assim como os principais aspectos técnicos de funcionamento da geração de energia elétrica por fonte eólica, com ênfase nos aerogeradores de eixo horizontal, pois são os utilizados no Brasil. Em seguida, realizou-se, com base nos atlas eólicos nacionais e estaduais publicados até a presente data, a exposição das velocidades e direções predominantes e tipos de ventos característicos de cada uma das cinco regiões brasileiras e dos estados mais influentes neste potencial. Por fim, constatou-se que a Região Nordeste é a mais promissora na geração de energia por fonte eólica.

**Palavras-chave:** Energia Eólica, Potencial Eólico Brasileiro, Velocidade Média dos Ventos no Brasil, Aerogeradores de Eixo Horizontal.

## ABSTRACT

This paper presents a study of wind energy in Brazil, stating the estimated wind resource of each of the five national regions, by means of literature based on books, scientific papers, indexed journals and materials made available by the main characteristics bodies and institutions responsible for the Brazilian electricity sector, printed or in digital format. Initially a general explanation of the principles of wind energy will be taken, showing the origin of the winds and the factors that influence their behavior, as well as the main technical aspects of operation of power generation through wind power, with emphasis on horizontal axis wind turbines, as are those used in Brazil. Then he realized, based on state and national wind atlas published to date, exposure of prevailing speeds and directions and types of winds characteristic of each of the five Brazilian states and the most influential regions in this potential. Finally, it was found that the Northeast is the most promising in generating energy through wind power.

**Keywords:** Wind energy, Wind Potential Brazilian, Average Wind Speed in Brazil, Horizontal Axis Wind Turbines.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Ilustração da distribuição geral dos ventos.....	17
<b>Figura 2</b> - Ilustração do comportamento do vento sob a influência das características do terreno.....	19
<b>Figura 3</b> - Ilustração da Influência da mudança de rugosidade no perfil vertical do vento. ...	20
<b>Figura 4</b> - Ilustração das turbulências causadas por diferentes obstáculos. ....	22
<b>Figura 5</b> - Ilustração do perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. ....	22
<b>Figura 6</b> - Ilustração das duas principais forças aerodinâmicas que atuam sobre os rotores de uma turbina eólica. ....	24
<b>Figura 7</b> - Ilustração de uma (a) turbina eólica de eixo vertical e (b) das principais partes....	26
<b>Figura 8</b> - (a) Fotografia de um dos aerogeradores de turbina horizontal do parque eólico da praia do Morro Branco em Beberibe - CE e (b) ilustrações das suas principais partes.....	27
<b>Figura 9</b> - Ilustração da variação da velocidade do vento por meio do rotor da turbina. ....	28
<b>Figura 10</b> - Gráfico das curvas de potência extraída por uma turbina eólica, em função da velocidade da turbina.....	29
<b>Figura 11</b> - Gráfico da relação coeficiente de potência em função do número de pás. ....	30
<b>Figura 12</b> - Gráfico com curvas de distribuição de (a) Weibull e (b) Rayleigh. ....	31
<b>Figura 13</b> - Ilustração da interferência do rotor do aerogerador no fluxo de vento.....	33
<b>Figura 14</b> - Representação de um sistema elétrico de conversão eólica com correção de fator de potência utilizando estágio CC/CC intermediário. ....	34
<b>Figura 15</b> - Ilustração dos sensores de vento, anemômetro e veleta, presentes em turbinas eólicas. ....	38
<b>Figura 16</b> - Fotografia de um aerogerador instalado em uma rota de migração de aves.....	39
<b>Figura 17</b> - Fotografia de um parque eólico implantado em conjunto com a agropecuária. ...	40
<b>Figura 18</b> – Gráfico da sazonalidade e do regime dos ventos na Região Nordeste. ....	43

<b>Figura 19</b> - Ilustração do potencial eólico em função da velocidade média dos ventos no Brasil (a) em 2001 pela ANEEL e (b) em 2010 pelo EPE. ....	44
<b>Figura 20</b> - Gráfico da matriz elétrica brasileira, em janeiro de 2014.....	45
<b>Figura 21</b> - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Centro-Oeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude. ....	46
<b>Figura 22</b> - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Nordeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude. ....	48
<b>Figura 23</b> - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Norte, estimado em 2001, a 50 m de altitude. ....	53
<b>Figura 24</b> - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Sudeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude. ....	55
<b>Figura 25</b> - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Sul, estimado em 2001, a 50 m de altitude1. ....	59

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Classificação do terreno quanto a rugosidade. ....	21
<b>Tabela 2</b> - Estimativa anual das principais causas de mortalidade de pássaros.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica – Associação Brasileira de Energia Eólica  
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica  
ASPE – Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo  
BA – Bahia  
BDFIG – geradores duplamente alimentados sem escovas  
CA – corrente alternada  
CBEE – Centro Brasileiro de Energia Eólica  
CC – corrente contínua  
CE – Ceará  
ce-eolica – centro de energia eólica  
Cemig – Companhia Energética de Minas Gerais S.A.  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
CESP – Companhia Energética de São Paulo  
CHESF – Companhia Hidro Elétrica do São Francisco  
CIMATEC – Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia  
CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono  
COELBA – Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia  
COPEL – Companhia Paranaense de Energia  
COSERN – Companhia Energética do Rio Grande do Norte  
CRESESB – Centro de Referência em Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito  
DFIG – geradores de indução duplamente alimentados.  
Eletrobrás – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
EUA – Estados Unidos da América  
GW – gigawatt (10<sup>9</sup> watts)  
GWEC - Global Wind Energy Council  
GWh – gigawatt-hora  
GWh/ano – gigawatt-hora por ano  
IBENBRASIL – Iberdrola Empreendimentos S.A.  
km – quilômetros  
km<sup>2</sup> – quilômetros quadrados  
km/h – quilômetros por hora  
kV – quilovolt

kW – quilowatt

L – Leste

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

m – metros

m/s – metros por segundo

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia

MTOI – M. Torres Olvega Industrial

MW – megawatt ( $10^6$ watts)

N – Norte

PE – Pernambuco

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

PUCRS – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul

RN – Rio Grande do Norte

RPM – rotações por minuto

RS – Rio Grande do Sul

S – Sul

SC – Santa Catarina

SECTI – Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação

SEE – Secretaria de Energia

SEINPE – Secretaria de Estado de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo

SEINFRA – Secretaria de Infraestrutura

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SFE – Sociedade Fluminense de Energia Ltda

SP – São Paulo

STH – Sistema de Telemetria e Monitoramento Hidrometeorológico

TEEH – turbina eólica de eixo horizontal

TEEV – turbina eólica de eixo vertical

TWh – terawatt-hora

TWh/ano – terawatt-hora por ano

UCA – projeto Um Computador por Aluno

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFRGS – Universidade Federal do rio grande do sul

W – Oeste

# SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS .....	iv
RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	viii
LISTA DE TABELAS .....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	xi
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1 OBJETIVOS .....	16
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	16
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
1.1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
2. OS VENTOS.....	17
3. FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS .....	19
3.1 RUGOSIDADE DO TERRENO .....	20
3.2 PRESENÇA DE OBSTÁCULOS .....	21
3.3 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA ALTURA .....	22
3.4 TURBULÊNCIA.....	23
4. ASPECTOS TÉCNICOS DE FUNCIONAMENTO .....	24
4.1 AERODINÂMICA .....	24
4.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR .....	25
4.2.1 TURBINA EÓLICA .....	26
4.2.2 GERADOR ELÉTRICO .....	33
4.2.3 CONVERSORES ESTÁTICOS .....	33
4.2.4 TORRE.....	34
4.2.5 NACELE.....	35
4.2.6 FREIOS .....	35
4.2.7 CAIXA MULTIPLICADORA .....	35
4.2.8 PÁS DO ROTOR .....	35
4.2.9 SISTEMAS DE CONTROLE AERODINÂMICO DA POTÊNCIA .....	35
4.2.9.1 CONTROLE PASSIVO DE PERDA DE EFICIÊNCIA AERODINÂMICA .....	36
4.2.9.2 CONTROLE ATIVO DE PERDA DE EFICIÊNCIA AERODINÂMICA .....	36
4.2.10 CONTROLE DE PASSO .....	37

4.2.11	CUBO DO ROTOR.....	37
4.2.12	EIXO .....	37
4.2.13	SISTEMA DE DIRECIONAMENTO .....	37
4.2.14	SISTEMA DE CONTROLE .....	37
4.2.15	SENSORES DE VENTO .....	38
4.3	IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS .....	38
5.	MATERIAL E MÉTODO .....	41
6.	POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO.....	42
6.1	REGIÃO CENTRO-OESTE.....	46
6.1.1	VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO .....	47
6.1.2	REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO.....	47
6.2	REGIÃO NORDESTE .....	47
6.2.1	VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO .....	49
6.2.2	REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO.....	51
6.3	REGIÃO NORTE .....	52
6.3.1	VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO .....	53
6.3.2	REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO.....	54
6.4	REGIÃO SUDESTE.....	55
6.4.1	VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO .....	55
6.4.2	REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO.....	58
6.5	REGIÃO SUL.....	59
6.5.1	VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO .....	60
6.5.2	REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO .....	61
6.	CONCLUSÃO .....	62
	REFERÊNCIAS .....	64

# 1. INTRODUÇÃO

A energia eólica vem sendo utilizada para geração de energia elétrica, em escala comercial, desde a década de 1970, quando os Estados Unidos e alguns países da Europa se interessaram em buscar fontes alternativas de energia para diminuir a dependência do petróleo e do carvão. A partir da década de 70, o potencial eólico do Brasil também se tornou objeto de estudo de aproveitamento energético. De 1976 a 1977, o Centro Técnico Aeroespacial do Instituto de Atividades Espaciais, ao processar os dados de velocidade do vento obtidos em aeroportos brasileiros, identificou o litoral da Região Nordeste como Região mais promissora para a realização de projetos-piloto para geração de energia eólico-elétrica.

O Brasil foi o país pioneiro na América Latina a instalar um aerogerador, no início da década de 1990. Este projeto foi resultado de uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), por meio de financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. A turbina eólica de 75 kW foi instalada em Pernambuco em 1992, no arquipélago de Fernando de Noronha, e chegou a gerar 10% da energia elétrica consumida na ilha, economizando 70.000 litros de diesel por ano. Alguns outros projetos, muitos deles experimentais, foram realizados nos anos seguintes, nos estados de Minas Gerais, Ceará, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraná e Santa Catarina (ANEEL, 2008). Durante os dez anos seguintes, porém, pouco se avançou na consolidação da energia eólica como alternativa de geração de energia elétrica no país, em parte pela falta de políticas, mas principalmente pelo alto custo da tecnologia.

Em 2001, estimou-se em 143 GW a potência tecnicamente aproveitável do Brasil. O maior potencial eólico nacional encontra-se na Região Nordeste. Atualmente, é um dos grandes desafios da humanidade unir o útil ao sustentável, e é a partir deste desafio que a energia eólica entra como alternativa de geração de energia renovável para auxiliar na produção de energia limpa, a partir do potencial eólico dessas regiões.

No Brasil, o ano de 2013 terminou com 142 parques eólicos, com capacidade total instalada de 3,46 GW de potência eólica (valor que representa 3% da matriz energética brasileira), representado 142% a mais do que a meta prevista de 2 GW.



## 1.1 OBJETIVOS

A seguir, são descritos os objetivos deste trabalho tanto em caráter geral quanto específico.

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial eólico nacional para geração de energia elétrica.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Destacar os potenciais regionais levando em conta sua importância no contexto nacional, verificando os principais tipos de vento, a qualidade, tais como: regularidade, velocidade média e direção preferencial, e o tipo aerogeradores contidos nos parques eólicos brasileiros.

### 1.1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Nos capítulos 2, 3 e 4, faz-se uma revisão bibliográfica, respectivamente, sobre as características dos ventos, a influência do terreno no comportamento do vento e os aspectos técnicos de funcionamento da geração de energia elétrica por fonte eólica, tais como composição de um sistema de conversão eólica, modelos de turbinas utilizadas e impactos ambientais causados.

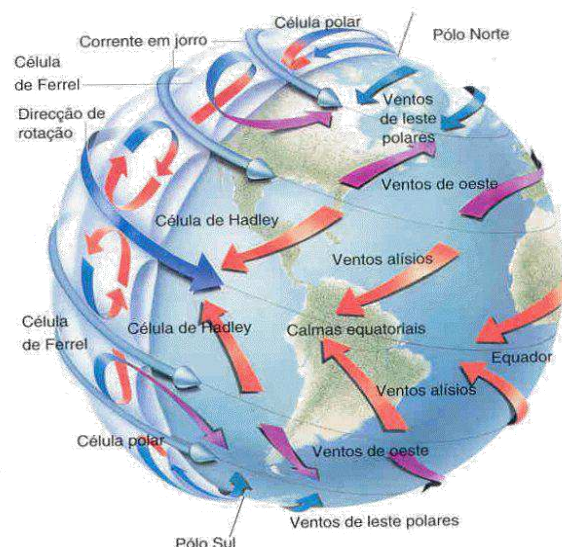
No capítulo 5, apresenta-se, com base em revisão bibliográfica dos atlas eólicos publicados no Brasil, o potencial eólico de cada uma das cinco regiões brasileiras (Centro-Oeste, Nordeste, Norte, Nordeste e Sul) baseando-se na velocidade e regime de seus referidos ventos.

No capítulo 6, faz-se as considerações finais e conclusões sobre o potencial eólico brasileiro, levando-se em consideração tudo que foi apresentado nos capítulos anteriores.

## 2. OS VENTOS

Os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera é ocasionada, entre outros fatores, devido 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 (AMARANTE, 2010).

As regiões tropicais, como pode ser observado na Figura 1, 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.



**Figura 1** - Ilustração da distribuição geral dos ventos (AMARANTE, 2001).

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 e são denominados 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.

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 (AMARANTE, 2010).

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 (AMARANTE, 2010).

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 (AMARANTE, 2010).

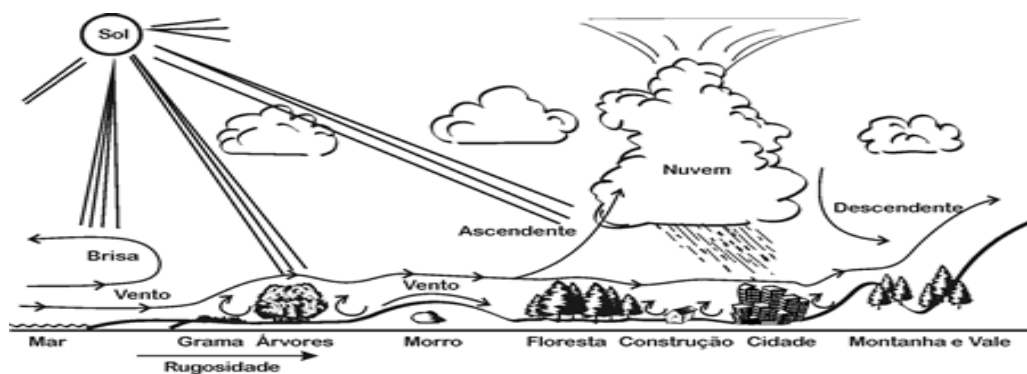
### 3. FATORES QUE INFLUENCIAM O REGIME DOS VENTOS

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

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

- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- A variação da velocidade com a altura;
- Turbulência.

Na Figura 2, observa-se, de uma forma genérica, como os ventos se comportam quando estão sob a influência das características da superfície do solo.



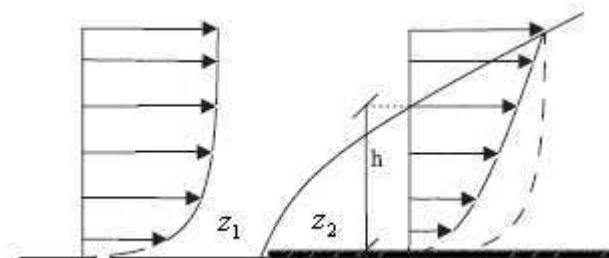
**Figura 2** - Ilustração do comportamento do vento sob a influência das características do terreno (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

### 3.1 RUGOSIDADE DO TERRENO

A rugosidade do solo pode ser definida como as irregularidades apresentadas na sua superfície. Dessa forma, pode-se dizer que uma superfície lisa apresenta baixa rugosidade, enquanto uma superfície mais irregular apresenta alta rugosidade.

Árvores, arbustos, vegetação rasteira e pequenas construções influenciam a rugosidade do solo.

O perfil vertical de velocidade do vento varia em relação à diferença de rugosidade na superfície do solo, como pode ser visto na Figura 3.



**Figura 3** - Ilustração da Influência da mudança de rugosidade no perfil vertical do vento. (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

Pode-se observar a influência no perfil vertical do escoamento devido à mudança de rugosidade  $Z_1$  para  $Z_2$ . O perfil da velocidade na superfície  $Z_2$  é mais aberto em relação ao perfil da superfície  $Z_1$ , ou seja, há uma transferência da velocidade da parte inferior para a parte superior do perfil, causado pelo atrito superficial (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

O comprimento de rugosidade  $Z_0$  é parametrizado em metros e é a altura em que a velocidade do vento é zero. Os valores típicos de  $Z_0$  são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1** - Classificação do terreno quanto à rugosidade.

Classes de cobertura do solo	Descrição	$Z_0$ (m)
Água	Áreas representadas por lagoas e represas	0,0002
Solo exposto	Regiões não ocupadas por edificações e sem qualquer tipo de cobertura vegetal	0,03
Vegetação rasteira	Vegetação de pequeno porte ou com obstáculos esparsos em altura que podem ser árvores ou construções	0,1
Vegetação arbórea	Áreas com vegetação arbórea significativa, que podem ser remanescentes de florestas	1,0
Área urbana residencial	Regiões com edificações de até dois pavimentos, tipologia típica de bairros residenciais	0,33
Área urbana densa de altura média	Áreas compostas por residências e prédios de até 8 pavimentos, com pequeno afastamento entre eles	0,39
Área urbana de alta densidade	Regiões de densidade elevada que apresentam edificações acima de 10 pavimentos, com pequenos afastamentos entre eles	3,8

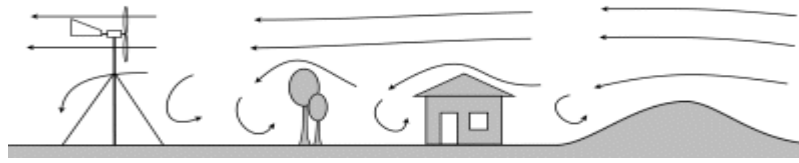
**Fonte:** Adaptado de BURTON; SHARPE; NICK (2001).

### 3.2 PRESENÇA DE OBSTÁCULOS

Edifícios, árvores, formações rochosas, entre outros, têm grande influência na diminuição da velocidade do vento, e são fontes de turbulência em sua vizinhança, sendo, dessa maneira, responsáveis pela queda do potencial eólico (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

Grande parte da turbulência é gerada na Região traseira do obstáculo, considerando-se como sendo a Região dianteira a face onde incide o fluxo dos ventos, e pode propagar-se até três vezes a dimensão do objeto, dessa forma, deve-se evitar grandes obstáculos próximo das turbinas eólicas, principalmente na direção do vento predominante.

Pode-se observar na Figura 4 como o escoamento é afetado na área envolvente dos obstáculos.



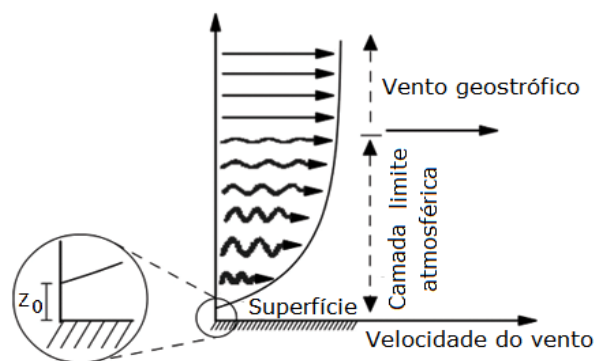
**Figura 4** - Ilustração das turbulências causadas por diferentes obstáculos (ELETRÔNICA, 2013).

A rugosidade do solo é um dos fatores que influenciam o efeito dos ventos em uma determinada Região, e por esta razão deve ser considerado na escolha do local de instalação de turbinas eólicas.

Caso os obstáculos se encontrem a menos de 1 km, medido segundo a direção de ventos predominantes, deve ser realizado inicialmente uma análise da turbulência no sítio onde será instalado o parque eólico.

### 3.3 VARIAÇÃO DA VELOCIDADE EM FUNÇÃO DA ALTURA

A variação da velocidade do vento em função da altura deve-se ao atrito gerado entre as massas de ar e a superfície do solo, que causa uma diminuição na velocidade do vento. Assim, quanto mais distante do solo maior será a velocidade do vento devido ao menor atrito com a superfície como pode ser observado na Figura 5.



**Figura 5** - Ilustração do perfil vertical da velocidade do vento, desde a superfície até a altura do vento geostrófico (CE-EOLICA/PUCRS, 2013).

O vento geostrófico é um modelo idealizado que apenas aproxima o comportamento verdadeiro do escoamento de ar em altos níveis (onde as forças de atrito não são significativas), em latitudes médias e altas (uma vez que nas proximidades do Equador a força de Coriolis é praticamente nula). Contudo, na linguagem técnica da energia eólica, o vento

acima de alguns poucos quilômetros da superfície, que não sofre influência do atrito da superfície, é comumente referido como sendo vento geostrófico.

Apesar de na atmosfera real os ventos nunca serem puramente geostróficos, o vento geostrófico idealizado fornece uma aproximação útil dos ventos reais em altos níveis. Os maiores desvios do vento em relação ao vento geostrófico ocorrem quando as massas de ar percorrem trajetórias de grande curvatura (AMARANTE, 2010).

As turbinas são instaladas na camada limite atmosférica, e nesta Região há uma variação na velocidade do vento dada a influência direta do atrito do solo. Por isso, é de grande importância saber como a velocidade do vento varia nessa camada, para avaliar não só a produção de energia elétrica com mais precisão, como também os carregamentos e fadigas impostos aos mecanismos das turbinas.

### 3.4 TURBULÊNCIA

Turbulência é uma flutuação na velocidade do vento em uma escala de tempo relativamente rápida, tipicamente menos do que cerca de 10 min. A turbulência afeta o aproveitamento da energia do vento, causando mudanças na direção e na velocidade do mesmo.

As principais causas da turbulência são:

- Atrito com a superfície da terra, que causa perturbações tão extensas quantos as geradas pelas características topográficas como colinas e montanhas;
- Efeitos térmicos, que causam o movimento vertical das massas de ar.

A turbulência é um processo complexo, e não pode ser simplesmente representado por equações determinísticas, sendo necessário recorrer a técnicas estatísticas.

A componente flutuante do vento pode conter uma energia considerável em frequências próximas das frequências de oscilação da estrutura da turbina eólica, submetendo essa estrutura a esforços que reduzirão seu tempo de vida útil ou, até mesmo, um colapso imediato de sua estrutura física. Como a turbulência é um fenômeno inerente ao escoamento e não é possível eliminá-la, deve-se considerá-la como um fator determinante no projeto de turbinas eólicas (AMARANTE, 2010).



## 4. ASPECTOS TÉCNICOS DE FUNCIONAMENTO

O princípio de funcionamento de um aerogerador consiste basicamente em duas fases de conversão:

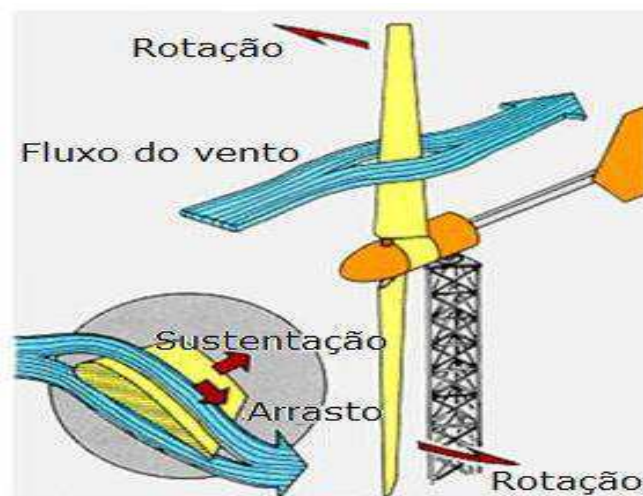
- 1ª O rotor, acionado pelas pás do aerogerador, retira energia cinética do vento e a converte em conjugado mecânico;
- 2ª O gerador converte o conjugado mecânico em eletricidade.

### 4.1 AERODINÂMICA

Diferentemente dos antigos projetos de moinhos de vento que dependiam essencialmente 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;
- O arrasto, que atua paralelamente ao fluxo do vento.

A ilustração dessas duas forças pode ser observada na Figura 6.



**Figura 6** - Ilustração das duas principais forças aerodinâmicas que atuam sobre os rotores de uma turbina eólica (CRESESB/CEPEL, 2013).

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 curvada e contra o vento gera um bolsão de baixa pressão acima dela. A área de baixa pressão puxa a pá na direção a favor do vento, um efeito conhecido como "empuxo". Na direção contra o vento da pá, o vento se move mais devagar e cria uma área de pressão mais elevada que empurra a pá, tentando diminuir sua velocidade. Como no desenho de uma asa de avião, uma alta relação de empuxo/arrasto é essencial no projeto de uma pá de turbina eficiente. As pás da turbina são torcidas, de modo que elas possam sempre apresentar um ângulo que tire vantagem da relação ideal da força de empuxo/arrasto (ALDABÓ, 2002).

## 4.2 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR

A primeira fábrica de aerogeradores instalada no Brasil foi a Wobben Windpower, erguida em Sorocaba em 1995. Até meados de 2008, foi a única empresa a produzir aerogeradores de médio e grande porte no país. O monopólio desta empresa gerou atrasos na instalação de parques do PROINFA e descontentamento com os preços praticados durante este período. Esta empresa, subsidiária da gigante alemã Enercon, é a única empresa presente no Brasil a dominar toda a cadeia de produção de equipamentos, e atualmente possui uma fábrica de naceles e pás em Sorocaba - SP, uma fábrica de pás em Pecém - CE e uma fábrica itinerante de torres de concreto em Parazinho - RN, além de parceria com uma fábrica de pré-moldados de concreto para produção de torres, a Ernesto Woebck, em Gravataí - RS.

Em 2008, foi quebrado o monopólio da Wobben Windpower, com a abertura de uma fábrica de naceles da empresa argentina Impsa, em Suape - PE. Juntas, estas empresas dominaram a fabricação de aerogeradores até a metade de 2011, quando foram inauguradas fábricas de aerogeradores da francesa Alstom e da espanhola Gamesa, ambas em Camaçari - BA, e o início da fabricação de aerogeradores pela empresa brasileira Eletromotores WEG SA (WEG), em parceria com a espanhola M. Torres Olvega Industrial (MTOI), em Jaraguá do Sul - SC.

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, nacele, cubo, eixo, freios, caixa multiplicadora, torre, entre outros componentes que serão abordados neste tópico (ALDABÓ, 2002). A fabricação destes equipamentos encontra-se concentrada em quatro fabricantes:

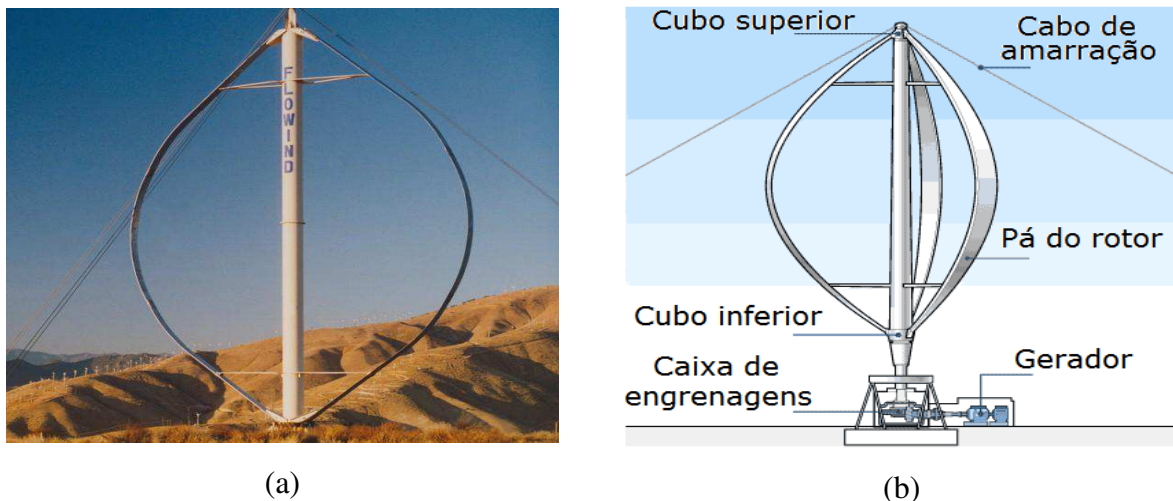
- Vestas: 15%;
- Suzlon: 25%;
- Impsa: 25%;
- Wobben Windpower: 31%;
- Demais empresas: 4%.

#### 4.2.1 TURBINA EÓLICA

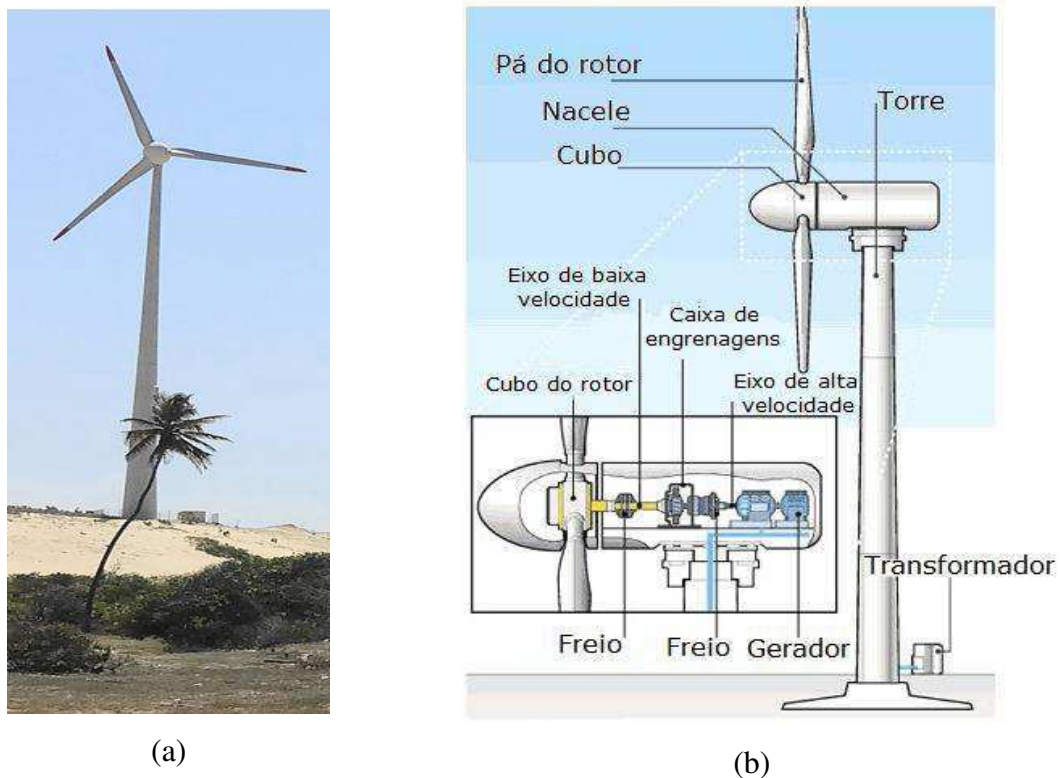
Atualmente são utilizados dois modelos principais de turbinas eólicas:

- Turbina eólica de eixo vertical;
- Turbina eólica de eixo horizontal.

As Figuras 7 e 8 expõem, respectivamente, estes dois tipos de turbinas.



**Figura 7** - Ilustração de uma (a) turbina eólica de eixo vertical e (b) das principais partes (2º Anuário Brasileiro das indústrias de Biomassa e Energias Renováveis, 2014).



**Figura 8** - (a) Fotografia de um dos aerogeradores de turbina horizontal do parque eólico da praia do Morro Branco em Beberibe - CE (fonte: próprio autor) e (b) ilustrações das suas principais partes (AMARANTE, 2010).

As turbinas de eixo vertical têm algumas vantagens em relação às horizontais, uma das quais é que o mecanismo de locomoção está mais perto do solo, daí mais fácil é sua manutenção. Elas também têm um centro de gravidade mais baixo. Sendo assim elas podem produzir eletricidade mais barata (ALDABÓ, 2002).

Estas turbinas são também mais simples no aspecto de que elas não precisam estar posicionadas de encontro ao vento, já que o vento pode mover elas de qualquer direção. Portanto, são melhores para uso em usinas eólicas no mar.

Como o vento as move em qualquer direção e com forças diferentes, há solavancos no movimento de torção, ou seja, a turbina move-se rápido, depois mais lenta, e mais rápida de novo, e assim acaba havendo um maior desgaste de suas partes mecânicas.

No entanto várias empresas e institutos, tais como Sandia Labs, California Institute of Technology e Ehmberg Solution – as duas primeiras de origem americana e a última de origem sueca – mantêm linhas de pesquisa sobre os designs possíveis para definir o que melhor atende às necessidades.

No Brasil, utilizam-se nos parques eólicos as turbinas de eixo horizontal, por isso, esta será a abordada neste trabalho.

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 por meio de uma conversão eletromecânica. A energia cinética do vento por unidade de volume, para uma dada velocidade do vento,  $V_v$ , pode ser calculada pela equação 1 (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

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

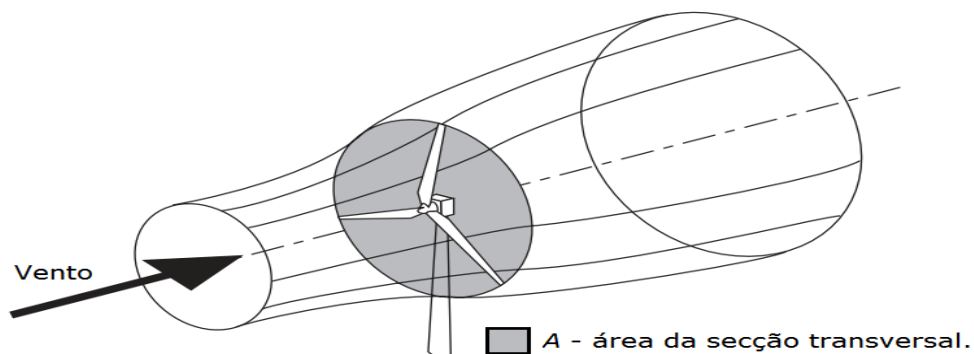
onde  $\rho$  é a massa específica do ar de, valor aproximadamente igual a  $1,2 \text{ Kg/m}^3$ .

E a potência disponível  $P_E$  é, portanto dada pela equação 2.

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

onde  $A$  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, como está ilustrado na Figura 9. Entretanto, na prática, o limite de Betz não pode ser atingido devido a imperfeições no design das pás e perdas relacionadas à turbulência e arrasto (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

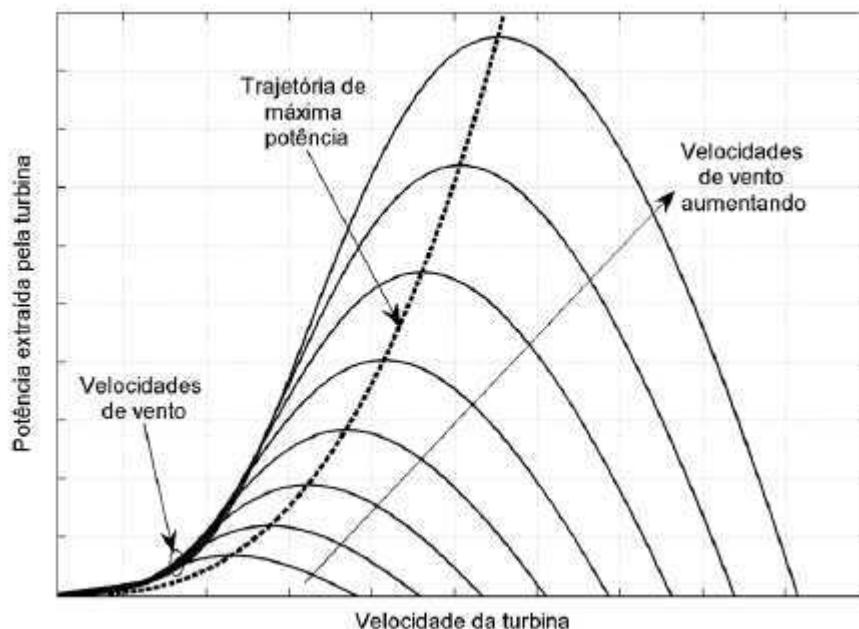


**Figura 9** - Ilustração da variação da velocidade do vento por meio do rotor da turbina. (Adaptado de BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

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,  $\lambda$ , e a velocidade do vento e do ângulo de passo das pás,  $\beta$ , que tem seus valores alterados em função das características aerodinâmicas das pás. A potência que pode ser extraída por uma turbina eólica de três pás com eixo horizontal pode ser calculada a partir da equação 3 (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

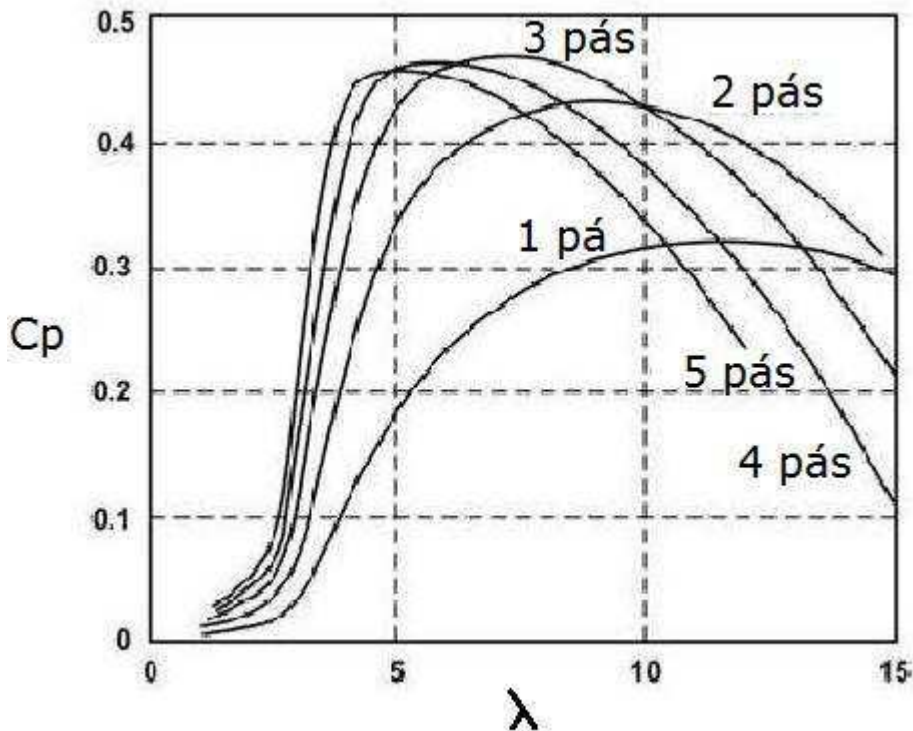
$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot V_v^3, \quad (3)$$

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. As curvas de potência extraída por uma turbina eólica, em função da velocidade da turbina, podem ser observadas na Figura 10.



**Figura 10** - Gráfico das curvas de potência extraída por uma turbina eólica, em função da velocidade da turbina. (USP, 2013).

Em relação à quantidade de pás utilizadas na turbina, tem-se ilustrado na Figura 11 a influência do número de pás no coeficiente de potência.



**Figura 11** - Gráfico do coeficiente de potência em função do número de pás (USP, 2013).

Turbinas de eixo horizontal com duas e três pás são as que permitem maior aproveitamento da energia eólica, com velocidades entre 7 m/s e 15 m/s. As mais comumente utilizadas, são as turbinas de eixo horizontal com três pás (ALDABÓ, 2002).

Para determinar a produção de energia de uma turbina eólica, não é suficiente saber a velocidade média do vento de certo local. É importante obter dados que registrem continuamente, por um período de tempo mínimo de um ano, a frequência de ocorrência de velocidades do vento. Esses dados são geralmente compostos por dezenas ou centenas de milhares de valores – médias de 1 minuto ou 10 minutos – amostrados em intervalos de 1 segundo, com anemômetros calibrados instalados em torres anemométricas.

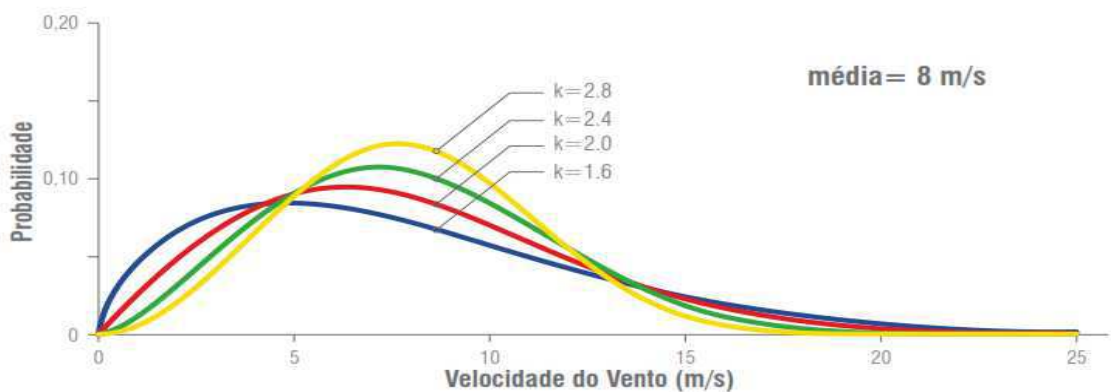
A distribuição de frequência de ocorrência da velocidade do vento para determinado local é geralmente descrita usando a função de distribuição estatística de Weibull, dada pela equação 4 (BURTON; SHARPE; NICK, 2001), uma vez que esta, por ser assimétrica, aproxima-se bem ao histograma de dados de vento na maioria dos casos reais.



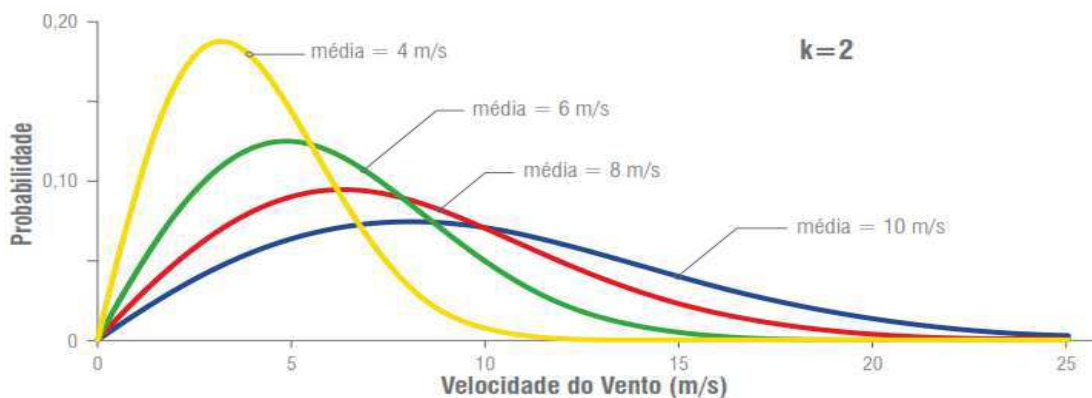
$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad (4)$$

onde o parâmetro de escala,  $C$ , expresso em metros por segundo, é extremamente ligado à velocidade média e o parâmetro de forma,  $k$ , adimensional, representa fisicamente a “dispersão”.

A distribuição de Weibull, como ilustra o gráfico da Figura 12(a), pode ser totalmente determinada conhecendo-se apenas os parâmetros de escala e de forma. Quanto maior o valor de  $k$ , menor a dispersão em torno do valor médio. Quando  $k$  é igual a 1, a distribuição estatística transforma-se em uma distribuição exponencial, enquanto que, quando  $k$  é igual a 2, o caso especial da distribuição de Rayleigh, como pode ser observado no gráfico da Figura 12(b), surge, podendo ser usada para estimativas preliminares, quando apenas a velocidade média é conhecida.



(a)



(b)

**Figura 12** - Gráfico com curvas de distribuição de (a) Weibull e (b) Rayleigh (AMARANTE, 2010).



A distribuição de Weibull contém as propriedades estatísticas da série temporal de velocidade de vento. Uma forma prática e rápida de calcular a produção de energia de um aerogerador é utilizar a distribuição de Weibull da velocidade do vento no local de instalação e a curva de potência do aerogerador, que é a relação entre a potência elétrica produzida pelo aerogerador e a velocidade do vento incidente na altura do eixo da turbina eólica.

A estimativa correta dos parâmetros de escala e forma de Weibull possibilita avaliar a da energia gerada com menores incertezas. O cálculo da produção anual de energia elétrica de um aerogerador é realizado por meio da equação 5 (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

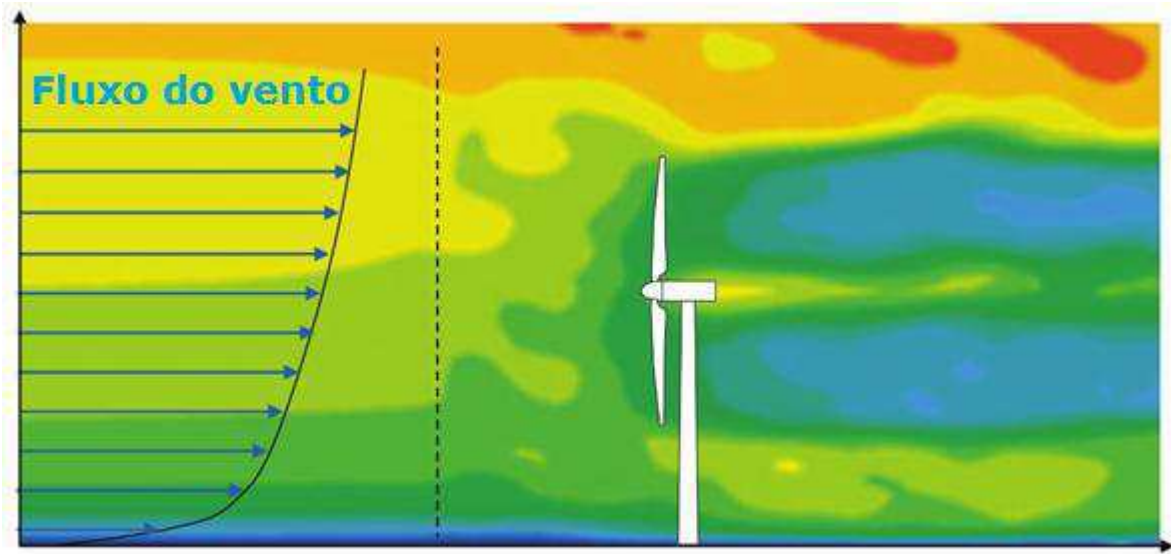
$$E = 8760 \cdot \int_0^{\infty} [P(v) \cdot f(v)] dv, \quad (5)$$

onde:

- 8760 é o número de horas por ano;
- $P(v)$  é a potência gerada, em kW, para uma velocidade do vento, em m/s, deduzida a partir da curva de potência do aerogerador;
- $f(v)$  é a frequência de ocorrência, em valores percentuais, da velocidade do vento, em m/s, calculada pela função probabilidade da distribuição de Weibull.

A energia total produzida por um parque eólico é obtida pela soma das produções energéticas de todos os aerogeradores do parque, descontadas as várias perdas ocasionadas por esteiras aerodinâmicas, indisponibilidades de equipamentos e rede elétrica, projeto de conexão elétrica e configurações de controle para limitação de potência, intervenções de manutenção, desvios da curva de potência ou calibração de sensores etc. (BURTON; SHARPE; NICK, 2001).

O movimento do rotor do aerogerador causa as esteiras aerodinâmicas, e estas dependem do tipo de perfil aerodinâmico utilizado, do tamanho e da rotação do rotor, das condições atmosféricas, da turbulência, e da velocidade de vento. O efeito de uma esteira aerodinâmica é a redução da velocidade do vento e o aumento da turbulência a jusante do rotor. A Figura 13 ilustra o efeito esteira provocado pelo rotor de um aerogerador no fluxo de vento, que sopra da esquerda para a direita (AMARANTE, 2010).



**Figura 13** - Ilustração da interferência do rotor do aerogerador no fluxo de vento (Modificado de AMARANTE (2010)).

#### 4.2.2 GERADOR ELÉTRICO

Na conversão de energia eólica em energia elétrica, máquinas elétricas são empregadas como geradores elétricos, acoplados a um sistema de transmissão mecânica que, por sua vez, é ligado ao eixo das pás do aerogerador (ALDABÓ, 2002). Dentre as máquinas existentes, a máquina de corrente contínua não é mais de interesse prático como gerador, devido a uma série de desvantagens, tais como:

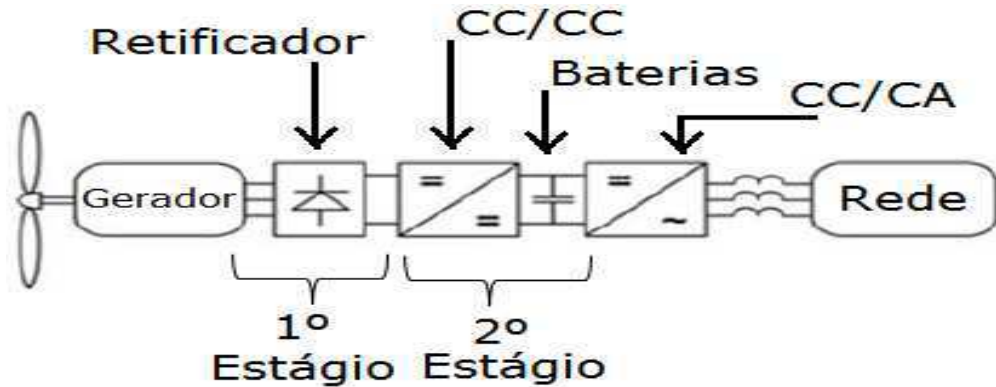
- Gastos elevados com manutenção por conta do desgaste das escovas;
- São maiores e mais pesadas do que as máquinas de corrente alternada, se considerado a mesma potência;
- Não são adequadas para possuir enrolamentos com alta tensão.

Atualmente, são utilizados em aerogeradores máquinas trifásicas síncronas e assíncronas.

#### 4.2.3 CONVERSORES ESTÁTICOS

Para processar a energia entregue pelo gerador, faz-se necessário, como pode ser observado na Figura 14, 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 (ALDABÓ, 2002).



**Figura 14** - Representação de um sistema elétrico de conversão eólica com correção de fator de potência utilizando estágio CC/CC intermediário (Modificado de USP, 2013).

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

- Possibilita 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;
- Provê a proteção eletrônica para a turbina e seus componentes, evitando danos em condições extremas de vento.

#### 4.2.4 TORRE

A torre é o item fundamental para sustentação e posicionamento do rotor. Capaz de sustentar o grande peso das partes componentes do aerogerador que ficam na nacela, ela é responsável pela maior parte dos custos 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 (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.5 NACELE

Nacele é a carcaça do aerogerador montada sobre a torre, e abriga as partes componentes do sistema de geração de energia como o gerador, a caixa multiplicadora, o eixo e os freios do sistema (WIKIPÉDIA, 2014).

#### 4.2.6 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 (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.7 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 têm velocidade nominal de operação entre 1200 e 1800 RPM. Um sistema de engrenagens é necessário para a multiplicação da velocidade entre os eixos do rotor e do gerador (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.8 PÁS DO ROTOR

As pás do rotor são responsáveis pela interação com vento, convertendo parte de sua energia cinética em trabalho mecânico rotacional no eixo. Atualmente são fabricadas em 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 (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.9 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, por meio de dispositivos que reduzem as forças aerodinâmicas geradas nas pás.

Usualmente a geração elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 2,5 a 3,0 m/s; abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica aproveitamento. Velocidades superiores de aproximadamente 12,0 m/s a 15,0 m/s, ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina. Em ventos muito fortes, ou seja, superiores a 25 m/s atua o sistema automático de proteção.

Ventos muito fortes têm ocorrência rara e negligenciável em termos de aproveitamento, e a turbulência associada é indesejável para a estrutura da máquina; neste caso, a rotação das pás é reduzida e o sistema elétrico é desconectado da rede elétrica. Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, *software* e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. Usualmente se usa telemetria de dados para monitoramentos de operação e auxílio a diagnósticos e manutenções (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.9.1 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 a 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 (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.9.2 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 (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.10 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 (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.11 CUBO DO ROTOR

O cubo do rotor é uma estrutura metálica situada à frente do aerogerador, constituída de aço ou liga de alta resistência. É montado e transportado como uma peça única a fim de evitar a montagem no local de instalação (ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2009).

#### 4.2.12 EIXO

O eixo, responsável pela conexão do cubo ao gerador, transferindo energia mecânica da turbina. Também constituído de aço ou liga de alta resistência (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.13 SISTEMA DE DIRECIONAMENTO

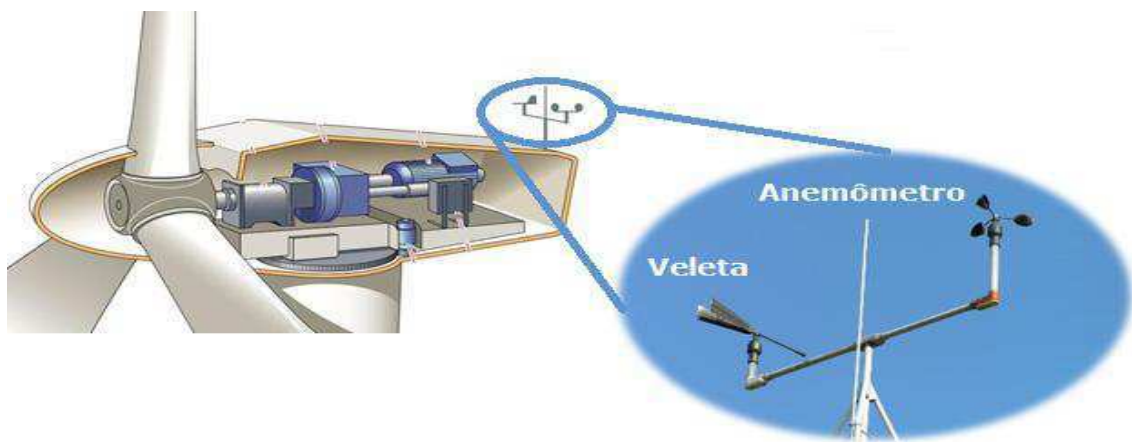
Os aerogeradores de grande porte possuem um sistema de direcionamento que faz com que a nacelle gire de acordo com a direção do vento. Para que isso ocorra, existem sensores que indicam a direção do vento e um sistema de engrenagens na ligação da torre com a nacelle, a qual é movimentada por meio da ação de um atuador elétrico ou hidráulico (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.14 SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle contém um microprocessador que monitora, continuamente, as condições do aerogerador. Em caso de um mau funcionamento, tais como sobrecarga, excesso de calor na caixa de engrenagens, etc., ele automaticamente inicia o processo de parada da turbina eólica (ALDABÓ, 2002).

#### 4.2.15 SENSORES DE VENTO

Os sensores de vento, como podem ser observados na Figura 15, são basicamente o anemômetro e a veleta. O anemômetro mede a velocidade do vento e a veleta monitora a direção do vento. Os sinais do anemômetro são usados pelo sistema de controle para partir o aerogerador quando a velocidade do vento está em torno de 3,5 m/s a 5,0 m/s. Quando esta velocidade é superior a 25,0 m/s, o sistema de controle dispara o processo de parada do aerogerador de forma a preservá-lo mecanicamente. Já o sinal da veleta é usado para girar o aerogerador contra o vento, por meio do mecanismo de orientação (ALDABÓ, 2002).



**Figura 15** - Ilustração dos sensores de vento, anemômetro e veleta, presentes em turbinas eólicas (modificado de ENERGÍAS RENOVABLES Y LIMPIAS: SOLAR, EÓLICA, GEOTÉRMICA, HIDRÁULICA E MAREOMOTRIZ, 2012).

### 4.3 IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS

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. Portanto, é uma alternativa limpa e complementar às outras fontes de energia (ALDABÓ, 2002).

Entretanto, a geração eólica apresenta alguns impactos ambientais. Os aerogeradores podem vir a ameaçar pássaros e morcegos, pois no caso de instalação realizada em rotas de migração de aves ou próximo ao *habitat* de morcegos haverá uma mortandade destes animais ocasionada pelo impacto entre os mesmos e as pás das turbinas, como pode ser visualizado na Figura 16 a ilustração de um aerogerador em rota de migração de aves. Porém, este impacto,

comparado a outras causas, é muito pequeno (ERICKSON; JOHNSON; YOUNG, 2005) como pode ser observado na Tabela 2.



**Figura 16** - Fotografia de um aerogerador instalado em uma rota de migração de aves (PORTAL ECODESENVOLVIMENTO.ORG, 2010).

**Tabela 2** - Estimativa anual das principais causas de mortalidade de pássaros.

Causas	Estimativa de mortalidade anual
Edificações/Janelas	550 milhões
Gatos	100 milhões
Linhas de alta tensão	130 milhões
Veículos	80 milhões
Pesticidas	67 milhões
Torres de comunicação	4,5 milhões
Aerogeradores	28,5 mil
Aviões	25 mil

**Fonte:** ERICKSON; JOHNSON; YOUNG (2005).

Há também uma alteração das paisagens, pois suas torres e hélices proporcionam uma poluição visual, porém, podem se integrar, de tal modo, ao ambiente, virando assim atrações turísticas. Existe ainda a possibilidade de causar interferência na transmissão de sinais de televisivos. Além disto, emitem ruídos de baixa frequência que podem causar algum incômodo aos seres humanos moradores das áreas circunvizinhas e aos animais na região, o que culmina em uma possível mudança de hábitos e comportamentos destes animais, ocasionando, por fim, alterações em seus ciclos de vida (ALDABÓ, 2002).



No entanto, todos os impactos citados estão sendo minimizados ao longo dos anos, em virtude de melhores estudos preliminares de impactos e dos aperfeiçoamentos tecnológicos (ALDABÓ, 2002).

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 e pecuária local, como pode ser observado na Figura 17 (ALDABÓ, 2002).



**Figura 17** - Fotografia de um parque eólico implantado em conjunto com a agropecuária (PORTAL DO PROFESSOR, 2013).

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 Global Wind Energy Council (GWEC) (2005). 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. Portanto, a utilização da energia eólica é uma alternativa viável na corrida para diminuir o efeito estufa causado pelas emissões de gás CO<sub>2</sub>, em no mínimo, 12%.

## 5. MATERIAL E MÉTODO

O presente trabalho trata-se de uma pesquisa bibliográfica, seguindo os princípios de uma pesquisa exploratória, a qual, segundo Gil (2008), corresponde àquela elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e, atualmente, com material disponibilizado na internet. A pesquisa bibliográfica tem como característica recuperar o conhecimento científico acumulado sobre um dado problema. O estudo foi realizado por meio da construção de um referencial teórico com base na literatura pertinente (GIL, op.cit).

O processo de síntese foi realizado a partir de uma análise descritiva, por meio de pesquisa bibliográfica com base em livros, artigos científicos, periódicos indexados e materiais disponibilizados por órgãos e instituições responsáveis pelo setor elétrico brasileiro, impressos ou em formato digital, e culminou com uma apresentação dos resultados encontrados.

## 6. POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

A avaliação do potencial eólico de uma região requer a medição precisa da variabilidade espacial e temporal do vento e condições climáticas na superfície. Essas informações, aliadas às condições geográficas, restrições ambientais e infraestrutura existente, são fundamentais para permitir a implantação de projetos eólicos.

É por isso que a caracterização do vento para desenvolvimento de parques eólicos requer a medição dos parâmetros eólicos com instrumentação adequada por períodos longos e análise estatística rigorosamente precisa. Torres anemométricas especiais para aplicações eólicas fazem uso de registradores e sensores desenvolvidos para esse fim, assim como técnicas e metodologias de coleta e tratamento de dados, visando à determinação do potencial eólico.

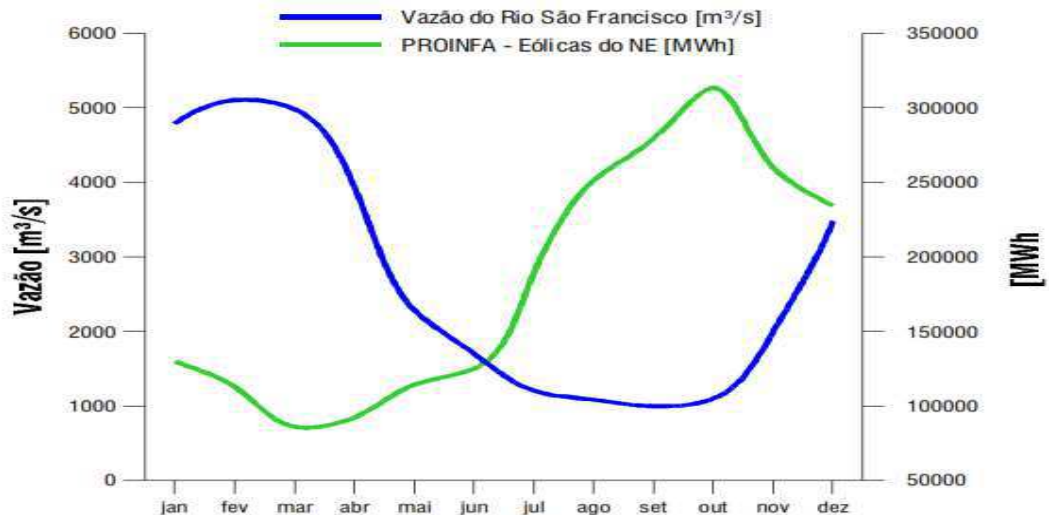
Entretanto, mesmo dentro do escopo de projeto de parque eólico, há a necessidade de utilização de modelos computacionais para extrapolação horizontal e vertical das características de vento, uma vez que é inviável economicamente utilizar torres anemométricas para mapear cada espaço do terreno. Modelos atmosféricos são usados para reproduzir a dinâmica dos fluidos e simular o escoamento do vento na superfície terrestre.

A partir destes dados são elaborados Atlas Eólicos que propiciam uma avaliação rápida do potencial eólico de uma determinada Região e permitem comparar o recurso eólico existente em várias áreas de interesse e, assim, definir se o local avaliado tem potencial promissor para desenvolvimento de parques eólicos, ou se o potencial deve ser aproveitado com pequenos e micros aerogeradores para aplicações isoladas ou para geração distribuída. Portanto, a utilização destes atlas foi de fundamental importância para o levantamento dos dados e resultados aqui obtidos neste trabalho.

O Brasil possui uma presença de ventos duas vezes superior à média mundial e uma oscilação de velocidade de apenas 5% e, portanto, torna o volume de energia eólica gerada mais previsível.

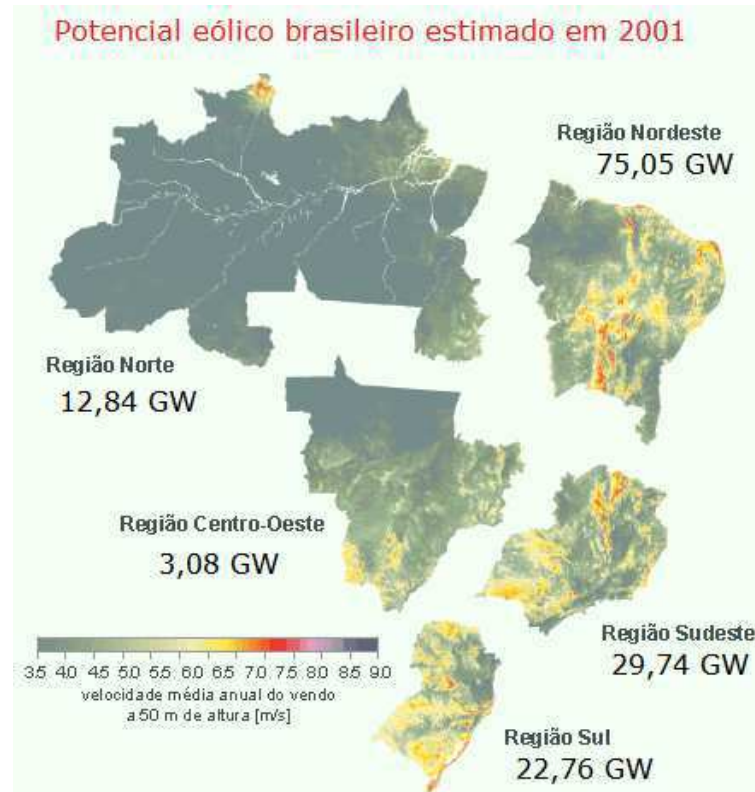
Outra característica principal é o fato de que a velocidade costuma ser maior nos períodos de estiagem, assim, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, preservando então a água dos reservatórios. Esta sazonalidade

está mais intensamente presente na Região Nordeste, que possui elevado regime de secas e, inversa a esta sazonalidade, um excelente regime dos ventos, como pode ser observado na Figura 18.

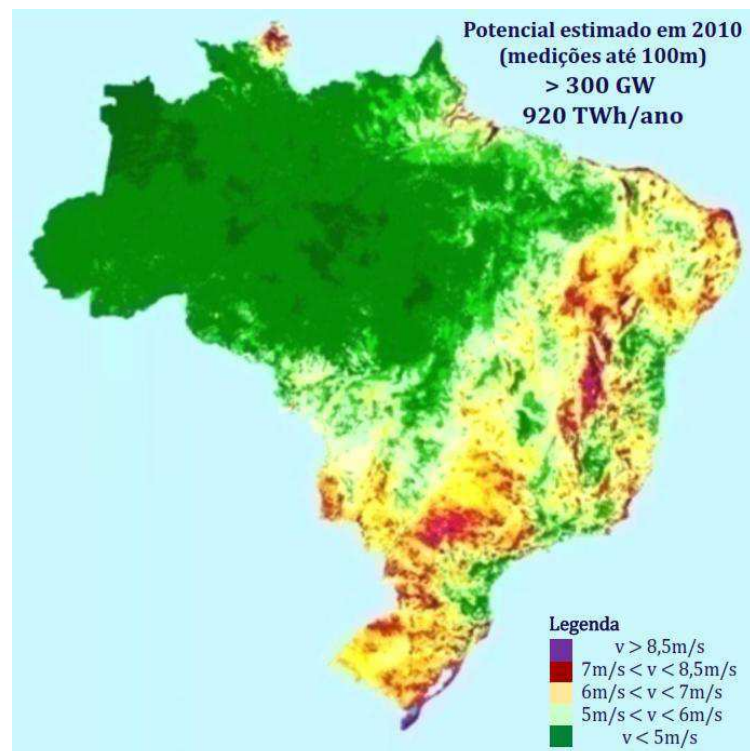


**Figura 18** – Gráfico da sazonalidade e do regime dos ventos na Região Nordeste (ELETROBRÁS; LACTEC; UFAL, 2008).

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa real do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20 GW. Estimativas contidas no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), publicado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), apontavam para um potencial de geração de energia eólica a 50 m de altura de, aproximadamente, 143 GW, como pode ser observado na Figura 19(a). No entanto, os últimos estudos indicam valores maiores que 200 GW podendo ser superiores a 300 GW, a uma altitude de 100 m, como foi estimado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2010) e que pode ser observado na Figura 19(b), sendo o Nordeste a região mais promissora em ambos os resultados, por possuir mais da metade destes potenciais. Essas divergências decorrem principalmente da falta de informações, tais como dados completos de superfície, e das diferentes metodologias empregadas nas avaliações. Porém, 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, do Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), do Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e das principais universidades de cada região, vem sendo elaborado um panorama do potencial eólico no Brasil.



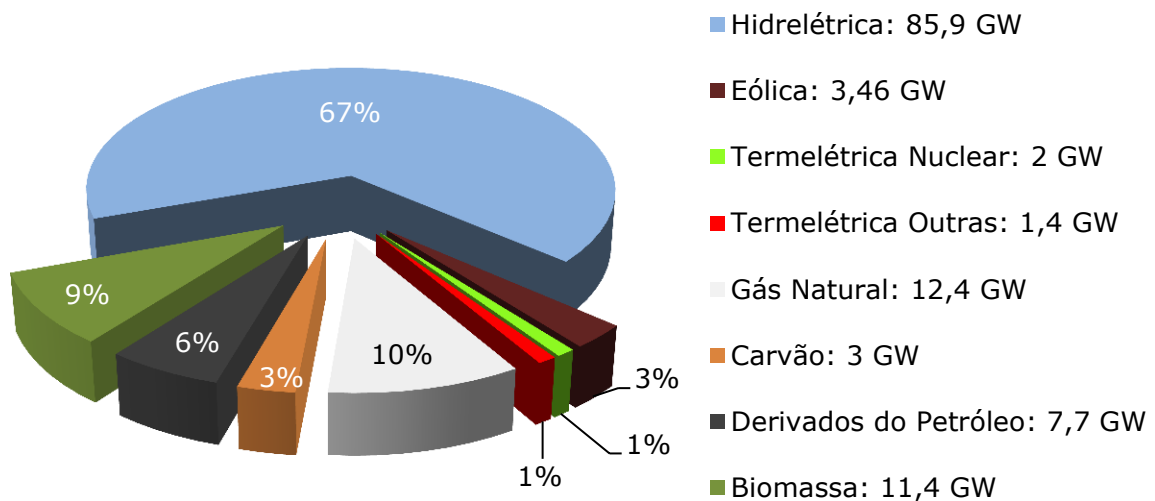
(a)



(b)

**Figura 19** - Ilustração do potencial eólico em função da velocidade média dos ventos no Brasil (a) em 2001 pela ANEEL e (b) em 2010 pela EPE (1º Anuário Brasileiro das indústrias de Biomassa e Energias Renováveis, 2013).

O ano de 2013 encerrou, de acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2014), com uma capacidade instalada de 3,46 GW, como pode ser observado no gráfico exposto na Figura 20, distribuída em 142 parques eólicos. O maior potencial brasileiro está presente no Nordeste, e os principais estados nacionais que contêm este potencial são Rio Grande do Norte, Bahia, Ceará e Rio Grande do Sul. Mas são apenas os principais, pois há uma série de estados promissores. Atualmente, as unidades têm 2 MW de potencial, mas já estão sendo desenvolvidas unidades capazes de gerar até 6 MW.



**Figura 20** - Gráfico da matriz elétrica brasileira, em janeiro de 2014 (ABEEólica, 2014).

As perspectivas, segundo a ABEEólica (2014), indicam 13,4873 GW de energia eólica em operação na matriz elétrica brasileira nos próximos seis anos, levando-se em conta os parques que estão em construção e a energia já contratada.

O ano de 2013 encerrou com a contratação recorde, em leilões do governo, e projeção de aplicar no setor eólico brasileiro R\$ 27 bilhões até 2017, valor este que se aproxima do orçamento estimado em R\$ 30 bilhões da usina de Belo Monte (ABEEólica, 2014).

No entanto, segundo o último relatório da ABEEólica (2014) até o fim de 2013, 48 parques eólicos mantinham-se parados no país, o que representava uma perda de geração suficientemente capaz de abastecer 2 milhões de residências, pois o modelo de planejamento de transmissão era realizar o leilão de geração e depois o da linha de transmissão. No entanto uma mudança nas regras dos futuros leilões, que passou a exigir que o parque eólico deva ter uma linha de transmissão prevista já no leilão e o prazo de implantação deva coincidir com a

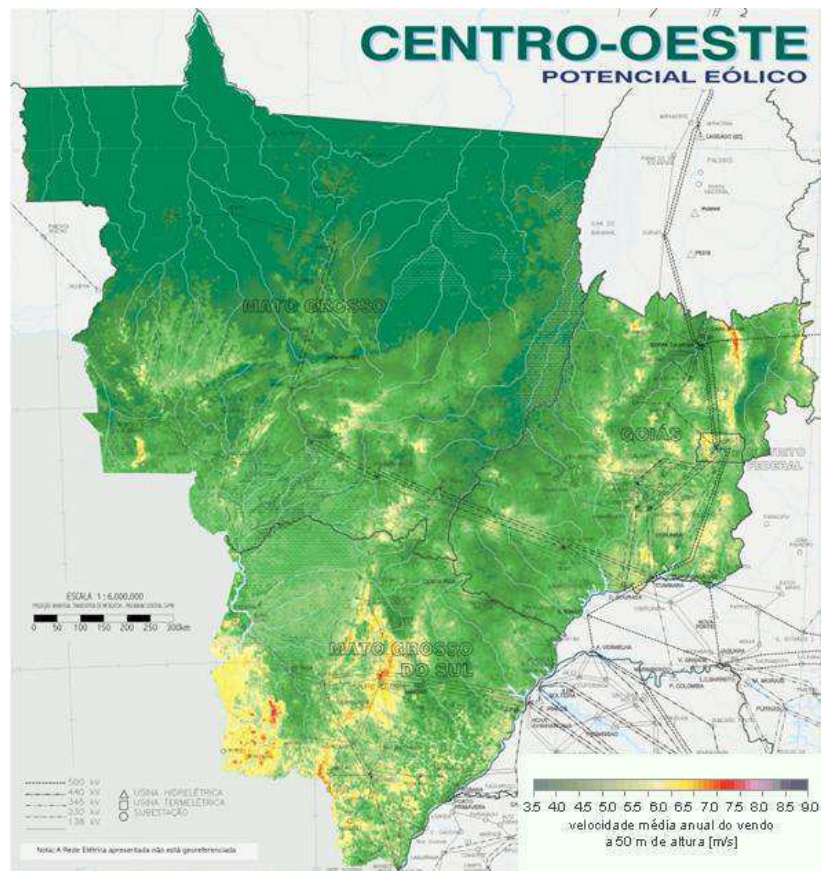


entrada do parque em operação, deverá mudar esse cenário de forma positiva (ABEEólica, 2014).

No último leilão, no fim de 2013, foram contratados 2,3 GW de energia eólica, elevando para 4,7 GW o volume negociado em 2013 e alcançando um novo recorde do setor. Esses números tendem a aumentar, pois o Ministério de Minas e Energia (MME) já confirmou a realização de dois novos leilões, com data prevista para o primeiro semestre de 2014 (ABEEólica, 2014).

## 6.1 REGIÃO CENTRO-OESTE

Na Região Centro-Oeste, o Atlas eólico brasileiro confirmou (AMARANTE et al., 2001) a existência de ventos razoáveis, principalmente nas áreas de fronteira com o Paraguai, como pode ser observado na Figura 21.



**Figura 21** - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Centro-Oeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

### 6.1.1 VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO

A Região do Planalto Central, que está ao sul da Bacia Amazônica e estende-se desde a margem esquerda da Bacia do Rio São Francisco até as fronteiras com Bolívia e Paraguai, possui velocidade média anual entre 4 m/s e 6 m/s a 50 metros de altitude. As velocidades médias anuais de vento variam de 3 m/s a 4 m/s ao norte dessa Região, isto é, no limite sul da Bacia Amazônica, para 5 m/s a 6 m/s sobre a porção sul do extenso planalto.

Destacam-se nessa área algumas regiões mais elevadas a oeste, na fronteira do Mato Grosso do Sul com o Paraguai, onde as velocidades médias anuais aproximam-se de 7 m/s.

A Região Centro-Oeste é a região brasileira menos promissora, apresentando um potencial eólico acumulado de 3,08 GW para velocidades do vento de no mínimo 7,0 m/s a 50 m de altura (AMARANTE et al., 2001).

### 6.1.2 REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO

A Região do Planalto Central é dominada pelo escoamento leste-sudeste em torno do Anticiclone Subtropical Atlântico. A intensidade do escoamento de leste predominante em larga escala aumenta para o sul, onde o gradiente de pressão é mais acentuado e a superfície tem menor rugosidade, pela vegetação menos densa.

As velocidades médias anuais nessa área são maiores nas regiões mais elevadas, na fronteira do Mato Grosso do Sul com o Paraguai, devido, principalmente, ao efeito de compressão vertical do escoamento ao transpor as elevações.

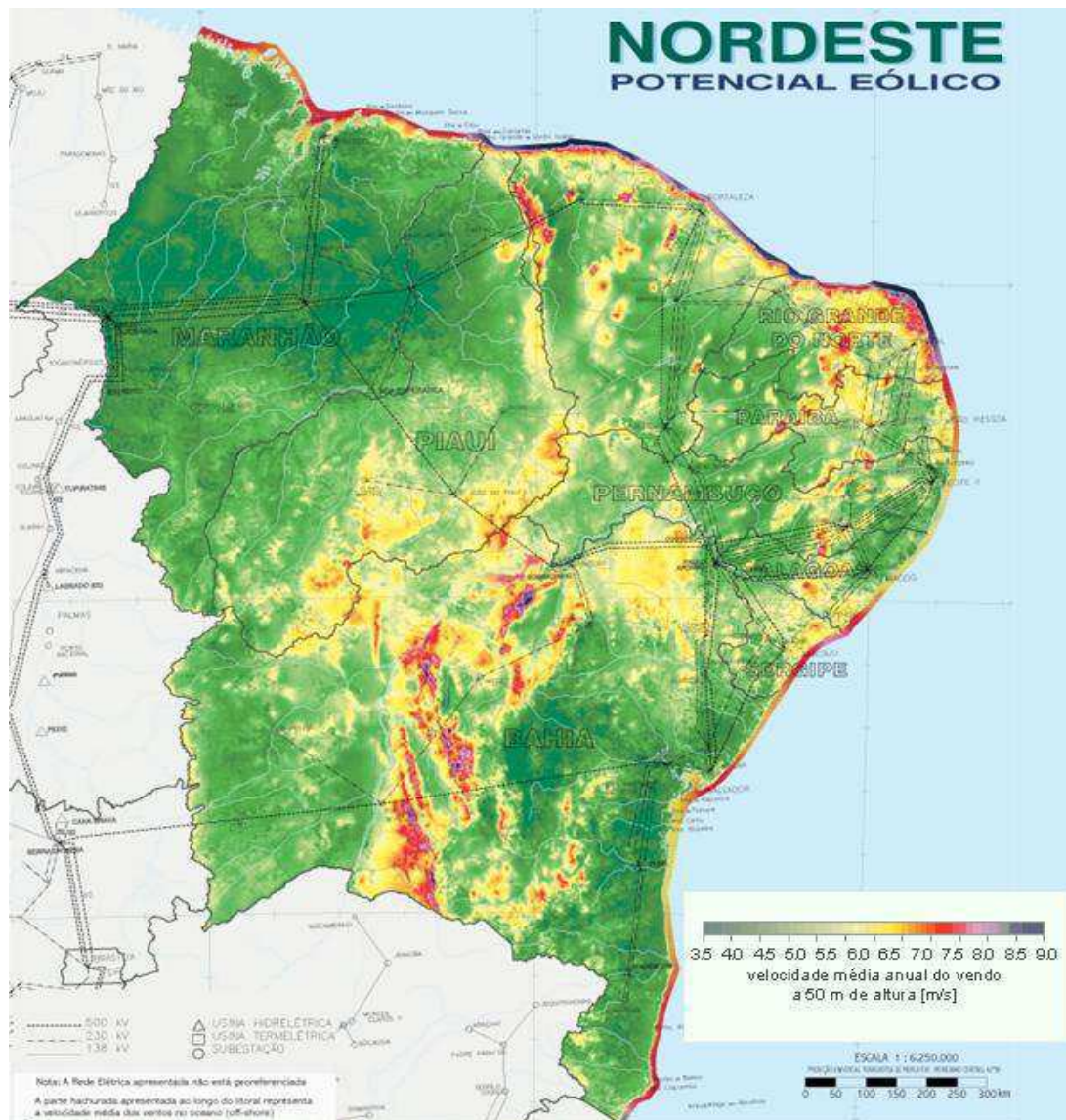
## 6.2 REGIÃO NORDESTE

Ao analisar dados de velocidade do vento, medidos em aeroportos brasileiros a 10 metros de altura, o Instituto de Atividades Espaciais revelou, em 1976, médias anuais de 4m/s para o Nordeste do Brasil, o que já induzia que esta Região era promissora para realização de projetos piloto para geração de energia eólica (AMARANTE et al., 2001).

Nos anos seguintes, mais pesquisas foram desenvolvidas sobre energia eólica. A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), após o processamento dos registros de



velocidade do vento de 81 estações meteorológicas para o período de 1977 a 1981, revelou que as maiores velocidades médias anuais, a 10 metros, foram encontradas para Macau - RN e Caetité - BA. Utilizando medidas de velocidade do vento, realizadas em torres superiores a 20 metros, em áreas da Região Nordeste que já eram apontadas como promissoras para geração de energia eólica, em 1996, foi realizado um estudo do potencial eólico que comprovou o litoral do Ceará e do Rio Grande do Norte como regiões de ventos adequados para implantação de turbinas eólicas (AMARANTE et al., 2001). Todos os estudos realizados, até então, continuam apontando a Região Nordeste como a mais promissora fonte de energia eólica do Brasil, como pode ser observado na Figura 22.



**Figura 22** - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Nordeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

## 6.2.1 VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO

A Região Nordeste, de acordo com o Atlas Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001) é a região brasileira mais promissora, apresentando um potencial eólico acumulado de 75,05 GW para velocidades do vento de no mínimo 7,0 m/s, a 50 m de altura.

Na Zona Litorânea Nordeste, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte a média anual da velocidade dos ventos é entre 6 m/s a 9 m/s a 50 m de altitude.

Por meio de um trabalho conjunto da Eletrobrás, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) e da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), foi elaborado o Atlas Eólico do Estado de Alagoas (2008) com base na análise dos dados obtidos, entre 2007 e 2008, de 6 torres anemométricas, sendo 2 com 100 m de altura e 4 com 50 m de altura, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 173 MW em 87 km<sup>2</sup>, 336 MW em 168 km<sup>2</sup> e 649 MW em 325 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. O fator de capacidade médio estimado, para áreas com velocidade média de 7 a 7,5 m/s, 7,5 a 8 m/s e 8 a 8,5 m/s, são respectivamente de 25,6%, 30,2% e 34,9%, a 75 metros de altura. A capacidade instalável, nos locais com velocidade superior a 7 m/s, é estimada em 458 GWh/ano, 822 GWh/ano e 1.340 GWh/ano nas alturas respectivas de 50 m, 75 m e 100 m.

A Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia (COELBA) elaborou o Atlas Eólico do Estado da Bahia (2002) com base na análise dos dados obtidos, entre 1994 e 2001, de 26 torres anemométricas de 20 e 30 metros, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 5,6 GW em 2.798 km<sup>2</sup> e 14,46 GW em 7.231 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas alturas de 50 m e 70 m, respectivamente. A capacidade instalável, nos locais com velocidade superior a 7,0 m/s, é estimada em 12,32 TWh/ano e 31,9 TWh/ano nas alturas respectivas de 50 m, 70 m. Fruto de uma parceria entre a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI), a Secretaria de Infraestrutura (SEINFRA) e Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial/Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia (SENAI/CIMATEC), foi publicado o Atlas Eólico da Bahia (CAMARGO-SCHUBERT, 2013) para altitudes de 80 m, 100 m, 120 m e 150 m com base em dados provenientes de 156 torres anemométricas espalhadas por toda a Bahia, em sua maior parte com alturas entre 80 e 100 m, mas também envolvendo torres de até 120 m, cujos resultados

da integração cumulativa indicam um potencial *onshore* estimado em 38,6 GW em 14.866 km<sup>2</sup>, 70,1 GW em 26.998 km<sup>2</sup>, 115,2 GW em 44.347 km<sup>2</sup> e 195,2 GW em 75.180 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas alturas de 80 m, 100 m, 120 m e 150 m respectivamente. A capacidade instalável *onshore*, nos locais com velocidade superior a 7 m/s, é estimada em 150,4 TWh/ano, 273,5 TWh/ano, 449,6 TWh/ano e 766,5 TWh/ano, nas alturas de 80 m, 100 m, 120 m e 150 m respectivamente. Os resultados da integração cumulativa indicam também um potencial *offshore* estimado em 77,4 GW em 20.947 km<sup>2</sup> e 87,5 GW em 23.613 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas alturas de 100 m e 150 m respectivamente. A capacidade instalável *offshore*, nos locais com velocidade superior a 7 m/s, é estimada em 308,7 TWh/ano e 350,3 TWh/ano, nas alturas de 100 m e 150 m, respectivamente.

A Secretaria da Infra-Estrutura (SEINFRA) do Governo do Estado do Ceará publicou o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará (2002) com base nos dados anemométricos de 33 estações de 10m a 50 m de altura, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 94,5 GW em 47.254 km<sup>2</sup> e 155,6 GW em 77.817 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,0 m/s, nas alturas de 50 m e 70 m respectivamente. Para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, os resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 5,8 GW em 2.911 km<sup>2</sup> e 24,9 GW em 12.426 km<sup>2</sup>, nas alturas de 50 m e 70 m, respectivamente. O fator de capacidade médio estimado, para áreas com velocidade média de 6,0 m/s, e 7,0 m/s, são respectivamente de 15% e 24%, a 50 metros de altura. Para altura de 70 m, o fator de capacidade médio estimado, para áreas com velocidade média de 6,0 m/s, e 7,0 m/s, são respectivamente de 17% e 24%. A capacidade instalável nos locais com velocidade superior a 6 m/s, é estimada em 123 TWh/ano e 233,7 TWh/ano nas alturas respectivas de 50 m e 70 m. Para áreas com velocidades médias de 7,0 m/s a capacidade instalável é estimada em 12,0 TWh/ano e 51,9 TWh/ano nas alturas respectivas de 50 m e 70 m.

A Companhia Energética do Rio Grande do Norte (COSERN) em seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), com suporte da Iberdrola Empreendimentos S.A. (IBENBRASIL), publicou o Atlas do Potencial Eólico do Estado do Rio Grande do Norte (CAMARGO-SCHUBERT, 2003) com base em dados anemométricos coletados entre 2002 e 2003 de 8 torres de 48 m de altura, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 36,127 GW em 24.085 km<sup>2</sup>, 47,655 GW em 31.770 km<sup>2</sup> e 55,385 GW em 36.924 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,0 m/s, nas alturas de 50 m,

75 m e 100 m respectivamente. Para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s os resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 95,62 GW em 6.375 km<sup>2</sup>, 19,431 GW em 12.954 km<sup>2</sup> e 27,08 GW em 18.053 km<sup>2</sup>, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. O fator de capacidade médio estimado, para áreas com velocidade média de 6,0 a 6,5 m/s, e de 7,0 a 7,5 m/s, são respectivamente de 20,6% e 32%, a 50 metros de altura. Para altura de 75 m o fator de capacidade médio estimado, para áreas com velocidade média de 6,0 a 6,5 m/s, e de 7,0 a 7,5 m/s, são respectivamente de 18,7% e 29,7%. Para altura de 100 m o fator de capacidade médio estimado, para áreas com velocidade média de 6,0 a 6,5 m/s, e de 7,0 a 7,5 m/s, são respectivamente de 15,5% e 24,8%. A capacidade instalável, nos locais com velocidade igual ou superior a 6 m/s, é estimada em 82,285 TWh/ano, 108,031 TWh/ano e 112,681 TWh/ano nas alturas respectivas de 50 m, 75 m e 100 m. Para áreas com velocidades médias a partir de 7,0 m/s, a capacidade instalável é estimada em 28,455 TWh/ano, 55,901 TWh/ano e 69,293 TWh/ano nas alturas respectivas de 50 m, 75 m e 100 m.

E, portanto, a Região Nordeste consolida-se como a mais promissora dentre as regiões brasileiras em todos os estudos sobre potencial eólico realizados até então.

## 6.2.2 REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO

Os ventos alísios que atingem a costa brasileira durante todo o ano, com mais intensidade no período de estiagem (de Julho a Dezembro), determinam o potencial eólico da Região Nordeste (MORAIS, 2004), que possui acentuada ocorrência nas direções sudeste e leste, destacando-se o litoral entre as cidades de São Luis, (MA) e Natal, (RN) (NUNES, 2012). Os ventos médios anuais chegam a superar 8 m/s, variação que está relacionada com o inverno austral. Em termos de densidade de potência eólica média horária associada à direção predominante do vento, tem-se menor potencial em Teresina e maior em Natal, quando comparadas as capitais no Nordeste brasileiro.

As velocidades são maiores na Zona Litorânea Nordeste, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte, devido a dois principais fatores:

- Os ventos alísios geralmente tornam-se mais fortes à medida que se afastam da Depressão Equatorial;

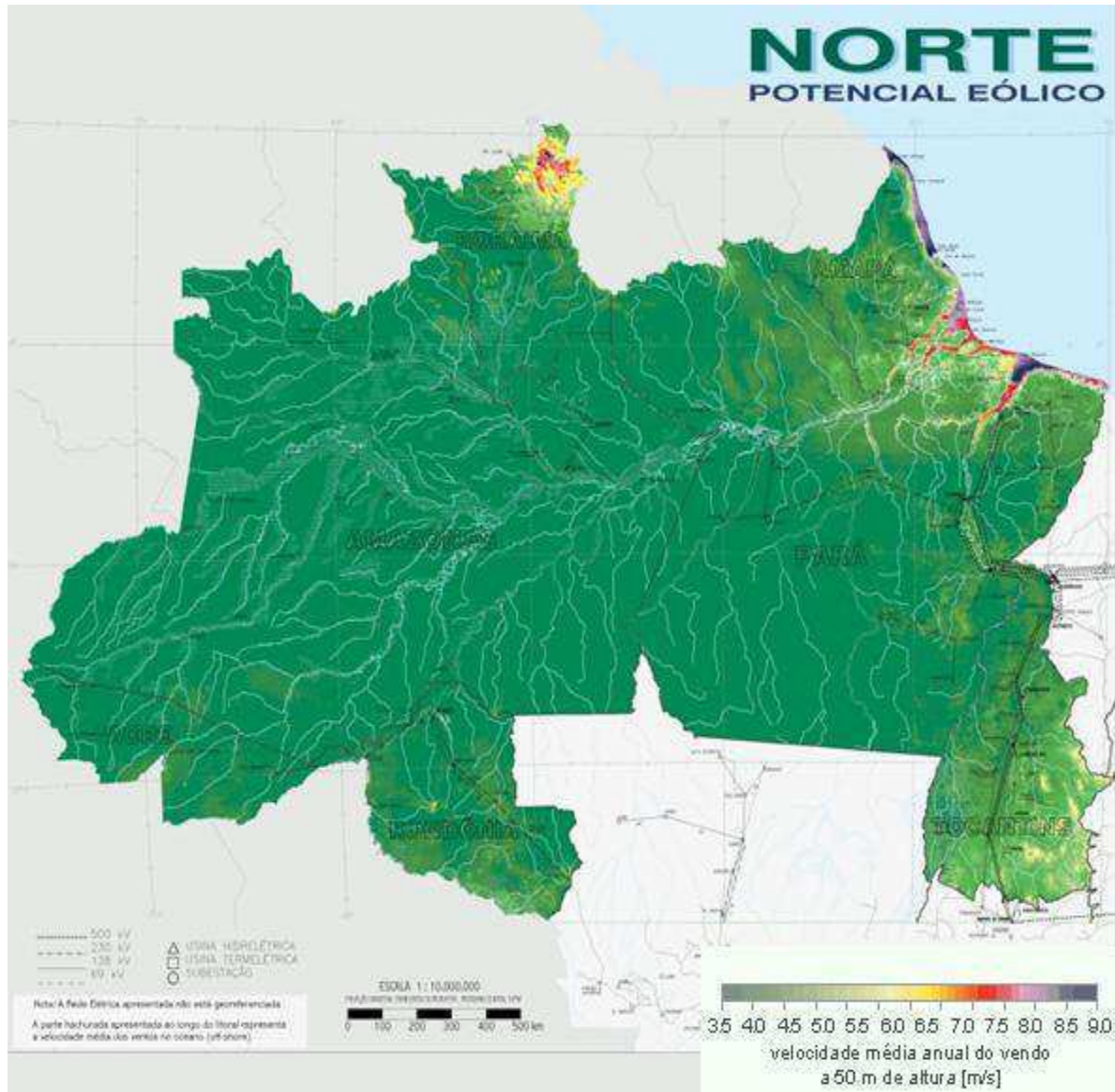
- As brisas marinhas são significativamente acentuadas nesta região, com mais intensidade, geralmente, no período de Julho a Dezembro, principalmente ao sul dessa região em razão dos menores índices de vegetação e de umidade do solo, fazendo que a superfície do solo atinja temperaturas mais elevadas durante as horas de sol e, conseqüentemente, acentuando o contraste de temperaturas terra-mar e as brisas marinhas resultantes.

Entretanto, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

No estado da Bahia, há a influência de dois mecanismos: ao sul, o Anticiclone Subtropical do Atlântico, perturbado pela dinâmica intermitente das ondas de massas polares; ao norte, os ventos alísios, caracterizados por um regime constante. Também se fazem presentes as brisas marinhas e terrestres, as brisas montanha-vale e os jatos noturnos. Na região das chapadas, no centro do Estado, assim como nas demais regiões elevadas, verifica-se uma complexa interação entre o deslocamento atmosférico e as formações montanhosas. As brisas marinhas e terrestres, e as brisas montanha-vale, com ciclos tipicamente diurnos, tendem a aumentar a intensidade do vento no final do dia nas regiões próximas ao litoral e, durante à noite, nas chapadas e montanhas no interior do Estado. A direção dos ventos que sopram sobre a Bahia varia relativamente pouco, predominando o sentido leste-oeste, com raríssimos registros no sentido oposto, geralmente associados a velocidades muito baixas.

### 6.3 REGIÃO NORTE

Apesar de a Região Norte não possuir muitas áreas com altas velocidades dos ventos de superfície, há uma área de altitude elevada em Roraima e uma estreita faixa litorânea ao longo de toda a Região com velocidades de ventos propicias, como pode ser observado na Figura 23.



**Figura 23** - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Norte, estimado em 2001, a 50 m de altitude (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

### 6.3.1 VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO

Na Bacia Amazônica Ocidental e Central, que estende-se aproximadamente entre as latitudes 10° S e 5° N, e longitudes 70° W e 55° W, as velocidades médias anuais de vento, a 50 m de altura, são inferiores a 3,5 m/s.

Apesar de não refletida nos ventos de superfície, existe uma faixa estreita de ventos médios anuais de 8 m/s a 10 m/s na camada entre 1.000 m e 2.000 m acima da superfície, onde esta localizada a Região da Serra Pacaraima, em Roraima; essa faixa inicia-se no Atlântico, a leste da foz do Rio Amazonas, e estende-se para oeste sobre a porção norte da



Bacia Amazônica e gradualmente se enfraquece, à medida que o escoamento aproxima-se das cadeias montanhosas da parte oeste do continente.

Na Zona Litorânea Norte, ou seja, a faixa costeira com cerca de 100 km de largura, que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá até o início da Zona Litoral Nordeste, os ventos são controlados primariamente pelos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas. Essa combinação das brisas diurnas com os alísios de leste resulta em ventos médios anuais entre 5 m/s e 7,5 m/s nos litorais do Amapá e Pará.

Entretanto, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

A Região Norte, de acordo com o Atlas Eólico Brasileiro de (AMARANTE et al.,2001), apresenta um potencial eólico acumulado de 12,84 GW para velocidades do vento de no mínimo 7,0 m/s, a 50 m de altura, tornando esta região o quarto melhor potencial nacional.

### 6.3.2 REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO

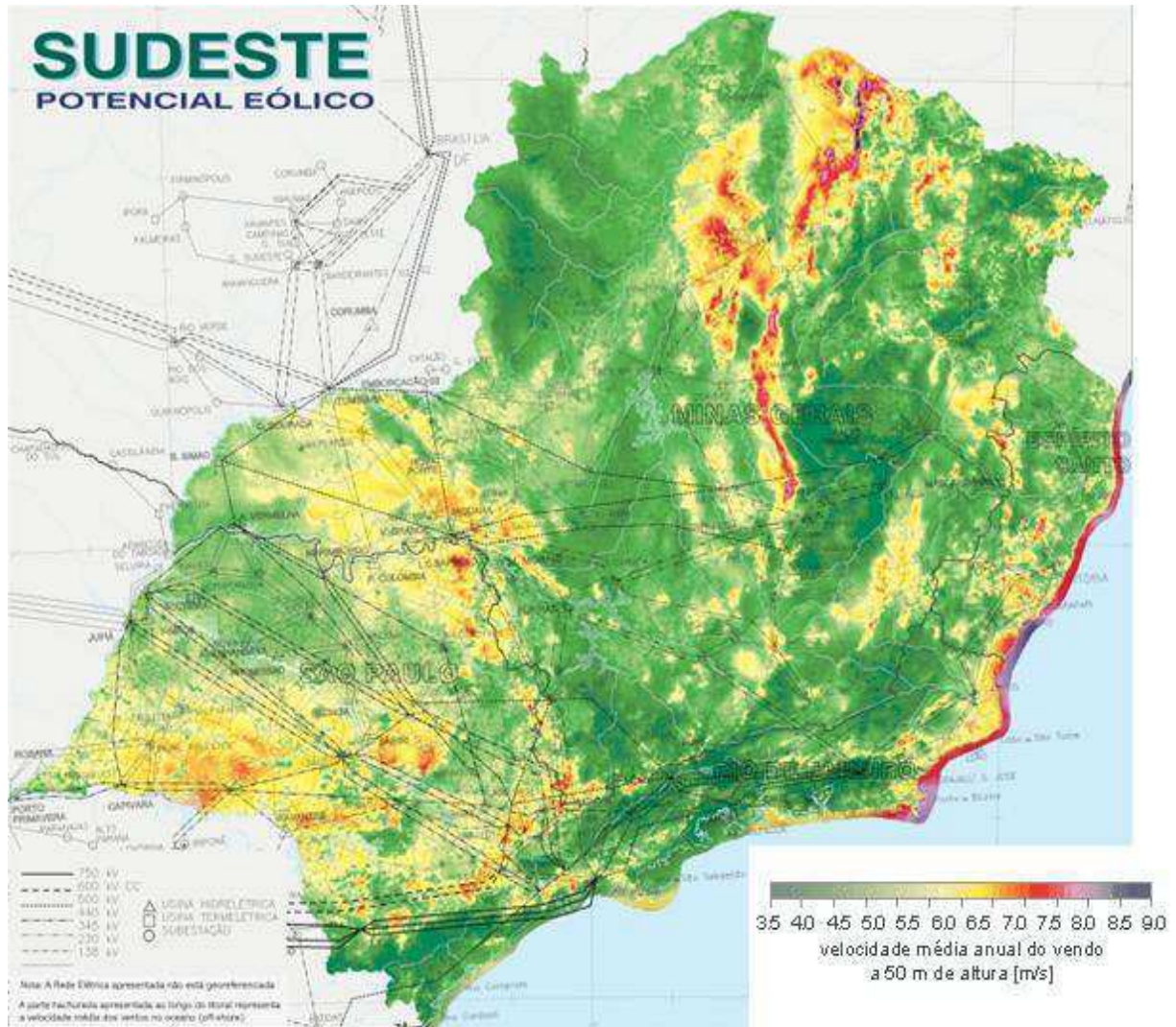
Na Bacia Amazônica Ocidental e Central, que estende-se aproximadamente entre as latitudes 10° S e 5° N, e longitudes 70° W e 55° W, os ventos alísios sobre essa Região são bastante reduzidos pelo atrito de superfície associado à longa trajetória sobre florestas densas e pelos gradientes fracos de pressão associados à zona difusa de baixas pressões centrada nessa Região da Bacia Amazônica.

Na Região da Serra Pacaraima, em Roraima, ao longo da fronteira Brasil-Venezuela, o escoamento de altitude alcança os níveis da superfície dos terrenos mais elevados, grande parte dos quais cobertos pela baixa rugosidade de savanas, onde em alguns locais também ocorrem canalizações orográficas. Entretanto, excetuando-se essa área isolada e única na Região, os ventos nessa grande área da Bacia Amazônica são muito fracos devido à baixa amplitude das variações de temperatura e à alta rugosidade/atrito de superfície.

Na faixa de 100 km de largura, referente a Zona Litorânea Norte, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

## 6.4 REGIÃO SUDESTE

Ao longo da Região Sudeste são verificados bons ventos no Norte Fluminense, no Espírito Santo, nas regiões mais elevadas do Estado de São Paulo, bem como em toda a costa, incluindo um promissor aproveitamento *offshore*. O potencial da Região Sudeste pode ser observado na Figura 24.



**Figura 24** - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Sudeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

### 6.4.1 VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO

A zona litorânea da Região Sudeste, faixa de aproximadamente 100 km de largura entre o Espírito Santo e Rio de Janeiro, possui índice de ventos, à altitudes até 50 m, que vão



de 3,5 m/s a 6 m/s sobre a maioria da costa. Na costa, entre as latitudes 21° S e 23° S, que corresponde a faixa do sul do Espírito Santo ao nordeste do Rio de Janeiro, as velocidades são próximas de 7,5 m/s.

Áreas de serras e chapadas, que se estendem ao longo da costa brasileira, desde o Espírito Santo até o Rio de Janeiro, a distâncias de até 1.000 km da costa possuem ventos com velocidades médias anuais que vão de 6,5 m/s até 8 m/s nos cumes das maiores elevações da Chapada Diamantina e da Serra do Espinhaço.

A Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE) lançou o Atlas Eólico do Espírito Santo (AMARANTE, 2009), com base em um mapeamento realizado, ao longo de 16 meses, por 6 torres anemométricas, instaladas em locais representativos das principais regiões do Estado, em áreas de baixa rugosidade e devidamente afastadas de obstáculos, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado e uma área utilizável de 0,129 GW em 86 km<sup>2</sup>, 0,448 GW em 299 km<sup>2</sup> e 1,143 GW em 762 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7 m/s, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. O fator de capacidade médio foi estimado para as áreas com velocidades médias anuais na faixa de 6,5 a 7,0 m/s em 22,4%, na altura de 75 m. O potencial *offshore*, de até 20 m de profundidade, e a área utilizável ao longo do litoral do Estado do Espírito Santo, considerando ventos de no mínimo 7 m/s, é de 0,332 GW em 221 km<sup>2</sup>, e 0,412 GW em 275 km<sup>2</sup>, nas alturas de 75 m e 100 m, respectivamente. O potencial *offshore*, de até 10 m de profundidade, e a área utilizável ao longo do litoral do Estado do Espírito Santo, considerando ventos de no mínimo 7 m/s, é de 4,708 GW em 3.139 km<sup>2</sup> e 5,554 GW em 3.703 km<sup>2</sup> nas alturas de 75 m e 100 m, respectivamente. A estimativa de geração eólica anual *onshore* é de 2,16 TWh/ano, 4,84 TWh/ano e 8,87 TWh/ano nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m. O potencial *offshore*, até 20 m é de 0,818 TWh/ano e 0,923 TWh/ano nas respectivas alturas de 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s. O potencial *offshore*, até 10 m é de 11,878 TWh/ano e 12,626 TWh/ano nas respectivas alturas de 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s.

A Companhia Energética de Minas Gerais S.A. (Cemig) lançou o Atlas Eólico do Estado de Minas Gerais (AMARANTE, 2010), resultante de medições anemométricas realizadas pelo Sistema de Telemetria e Monitoramento Hidrometeorológico (STH), que opera desde 1999 em 51 postos anemométricos, porém a maioria destes sensores estão instalados em estruturas não específicas para esse fim, como postes “duplo T” ou torres de

telecomunicações, a maioria com alturas variando entre 10 m e 30 m, por isso os dados brutos registrados foram filtrados e auditados, utilizando-se rotinas e algoritmos de verificação, recebendo eventuais correções antes de serem consolidados. Os resultados da integração cumulativa indicaram um potencial estimado e a área utilizável de 10,6 GW em 7.046 km<sup>2</sup>, 24,7 GW em 16.495 km<sup>2</sup>, e 39,0 GW em 26.029 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m. O fator de capacidade médio estimado para as áreas com velocidades médias anuais na faixa de 7,0 a 7,5 m/s é de 25% na altura de 75 m. disponíveis. A estimativa de geração eólica anual é de 25,8 TWh/ano, 57,8 TWh/ano e 92,1 TWh/ano nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s e tem magnitude comparável à do consumo anual observado no Estado de Minas Gerais durante os últimos anos.

A Secretaria de Estado de Energia, da Indústria Naval e do Petróleo (SEINPE) do Estado do Rio de Janeiro, com suporte da Sociedade Fluminense de Energia Ltda (SFE), produziu o Atlas Eólico do Estado do Rio de Janeiro (CAMARGO-SCHUBERT, 2002), com base em um mapeamento realizado, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado e a área utilizável é de 0,75 GW em 497 km<sup>2</sup>, 1,52 GW em 746 km<sup>2</sup> e 2,81 GW em 2.163 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. O potencial *offshore* e a área utilizável ao longo do litoral do Estado do Rio de Janeiro, considerando ventos de no mínimo 7 m/s, é de 0,197 GW em 132 km<sup>2</sup>, 0,275 GW em 183 km<sup>2</sup> e 0,337 GW em 225 km<sup>2</sup>, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. A estimativa de geração eólica anual *onshore* é de 2,16 TWh/ano, 4,84 TWh/ano e 8,87 TWh/ano e o *offshore* é de 0,57 TWh/ano, 0,89 TWh/ano e 1,10 TWh/ano nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s.

O governo do Estado de São Paulo, por meio de um trabalho conjunto da Secretaria de Energia (SEE), da Empresa Metropolitana de Águas e Energia (EMAE) e da Companhia Energética de São Paulo (CESP), elaborou o Atlas Eólico do Estado de São Paulo (2012) com base na análise dos dados obtidos de 8 torres anemométricas, sendo 5 com 75 m de altura, 2 com 100 m e 1, instalada no alto da Serra do Mar, com 50 m de altura, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 9 MW em 2 km<sup>2</sup>, 15 MW em 4 km<sup>2</sup> e 564 MW em 138 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. A estimativa de geração eólica anual é de 28 GWh/ano com fator de capacidade de 35,1%, 48 GWh/ano com fator de capacidade de

36,2% e 1.753 GWh/ano com fator de capacidade de 35,5% nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades acima de 7,0 m/s.

A Região Sudeste, de acordo com o Atlas Eólico Brasileiro (AMARANTE et al., 2001), apresentava um potencial eólico acumulado de 29,74 GW para velocidades do vento de no mínimo 7,0 m/s a 50 m de altura, porém, como exposto anteriormente, esse potencial ultrapassa os valores estimados em 2001.

## 6.4.2 REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO

Na costa, entre as latitudes 21° S e 23° S, isto é, sul do Espírito Santo e nordeste do Rio de Janeiro, as velocidades são maiores devido ao efeito de bloqueio, pelas montanhas imediatamente a oeste da costa, do escoamento leste-nordeste causado pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Nesse caso, é criada uma espécie de aceleração por obstáculo, pois o ar acelera-se para o sul para aliviar o acúmulo de massa causado pelo bloqueio das formações montanhosas. Ao sul dessa Região, a costa do Estado do Rio de Janeiro desvia-se para oeste, onde os ventos passam a ser consideravelmente mais fracos, devido ao abrigo das montanhas a norte e a nordeste. Disso, resultam velocidades relativamente menores na Região que engloba a cidade do Rio de Janeiro. O estado de Minas Gerais encontra-se numa zona de influência do centro de alta pressão Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. Sobrepostas a esse mecanismo, agem as perturbações causadas pelo sistema de baixa pressão do Chaco, além das intermitentes incursões de massas polares, chamadas de frentes frias, resultando em uma marcante sazonalidade.

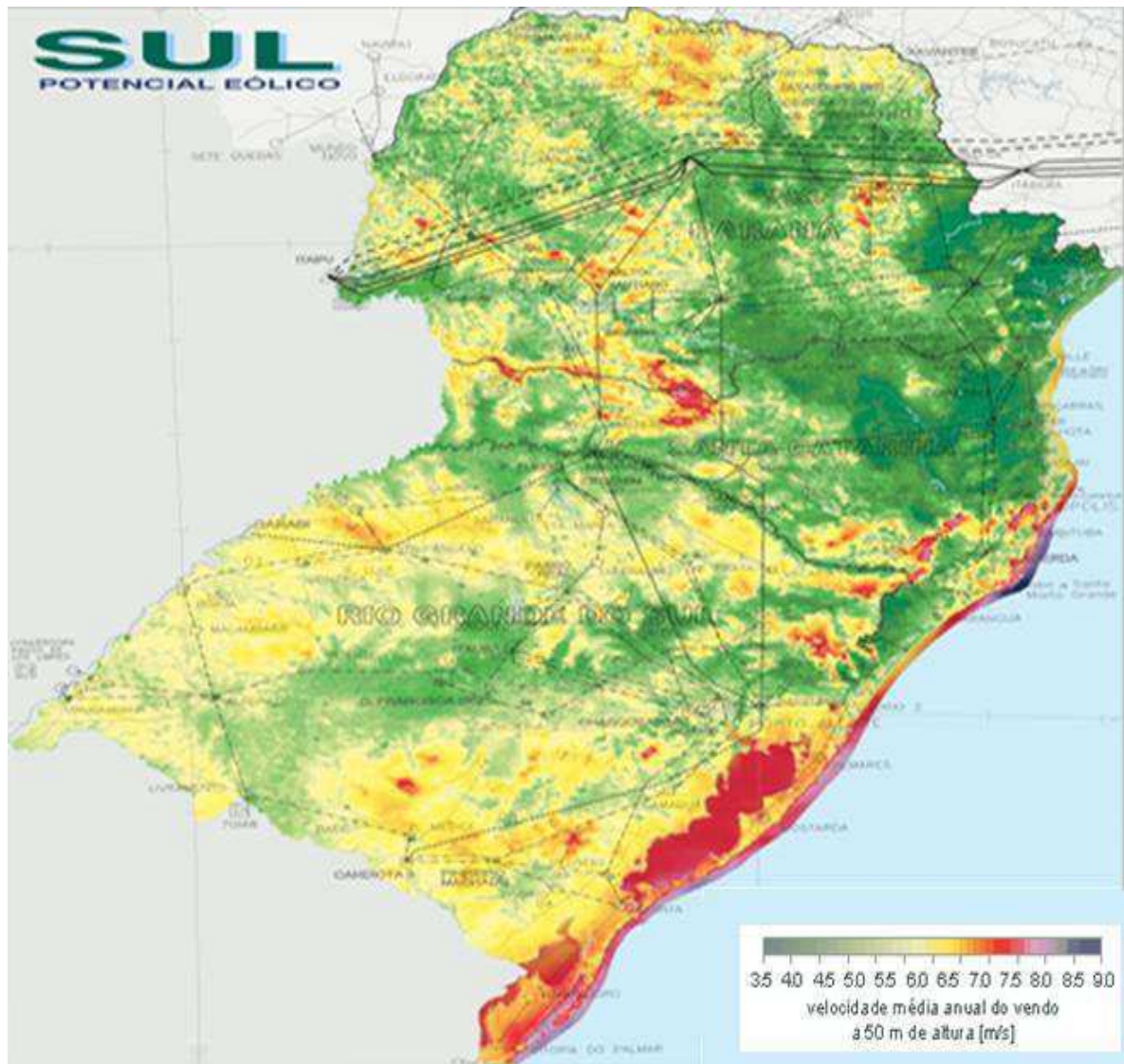
As maiores velocidades médias anuais, nas áreas de serras e chapadas da Região Sudeste, encontradas nos cumes das maiores elevações da Chapada Diamantina e da Serra do Espinhaço, ocorrem, principalmente, devido ao efeito de compressão vertical do escoamento predominante em larga escala, que é leste-nordeste, quando ultrapassa a barreira elevada das serras. Os ventos anuais mais intensos são geralmente encontrados nas maiores elevações, onde o efeito de compressão é mais acentuado. No entanto, o escoamento atmosférico é bastante complexo nessa Região, existindo outras características locais com influência adicional, resultantes de uma combinação de fatores relacionados à topografia e ao terreno.

Nos estados do Espírito Santo, Minas Gerais e Rio de Janeiro, predominam os ventos de quadrante leste e nordeste. No estado de São Paulo, as direções predominantes dos ventos

são sudeste, leste e nordeste, dependendo da localização no estado. A ocorrência de ventos na direção oeste é pouco frequente em todo o estado.

## 6.5 REGIÃO SUL

Na Região Sul, o potencial eólico está localizado nas maiores elevações montanhosas, ao longo do litoral sul e os planaltos de baixa rugosidade, como os Campos de Palmas no estado do Paraná. Porém o estado do Rio Grande do Sul possui a maior parcela deste potencial, como pode ser observado na Figura 25.



**Figura 25** - Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Sul, estimado em 2001, a 50 m de altitude<sup>1</sup> (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

### 6.5.1 VELOCIDADE DOS VENTOS E POTENCIAL NA REGIÃO

Na Região Sul, o Estado do Rio Grande do Sul, como um todo, retirando-se as áreas centrais que tem médias em torno de 4,5 m/s, verifica-se um potencial de utilização futuro muito elevado. Na Região dos Planaltos do Sul, as velocidades médias anuais, a 50 metros de altitude, vão de 5,5 m/s a 6,5 m/s sobre grandes áreas da Região.

Os ventos mais intensos, entre 7 m/s e 8 m/s, além de ocorrerem nas maiores elevações montanhosas, também estão presentes nos planaltos de baixa rugosidade, como os Campos de Palmas, no Paraná, e ao longo do litoral sul.

O estado do Rio Grande do Sul, apresenta um potencial de utilização muito elevado. O Atlas eólico deste Estado (CAMARGO et al., 2002) indica um potencial *onshore* estimado de 15,84 GW, para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, na altura de 50 m, e fator de capacidade de 29%, possibilitando a geração de 41,69 TWh/ano, para uma área útil de 10.558 km<sup>2</sup>. Para aproveitamentos a 75 m de altura, o Atlas indica um potencial que alcança 54,43 GW, e 132,86 TWh/ano de energia produzida em uma área 36.284 km<sup>2</sup>. Para aproveitamentos a 100 m de altura, o Atlas indica um potencial que alcança 115,19 GW, e 247,11 TWh/ano de energia produzida em uma área 76.797 km<sup>2</sup>. O potencial eólico *offshore* (sobre as Lagoas dos Patos, Mirim e da Mangabeira), também é muito promissor, sendo estimado em 18,52 GW em uma área 12.346 km<sup>2</sup>, 19,51 GW em uma área 13.006 km<sup>2</sup> e 19,74 GW em uma área 13.159 km<sup>2</sup> para as alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. A estimativa de geração eólica *offshore* (sobre as Lagoas dos Patos, Mirim e da Mangabeira) anual é de 51,84 TWh/ano, 54,61 TWh/ano e 50,72 TWh/ano nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 7,0 m/s.

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL) e o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC) elaborou o Atlas Eólico do Estado do Paraná (2008) com base na análise dos dados obtidos, entre 2003 e 2007, de 8 torres anemométricas de 100 e 50 metros de altura, cujos resultados da integração cumulativa indicam um potencial estimado de 8.066 MW em 15.310 km<sup>2</sup>, 30.619 MW em 93 km<sup>2</sup> e 65.275 MW em 32.638 km<sup>2</sup>, para áreas com ventos iguais ou superiores a 6,0 m/s, nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. Para áreas com ventos iguais ou superiores a 7,0 m/s, obteve-se uma estimativa de 312 MW em 156 km<sup>2</sup>, 1.363 MW em 681 km<sup>2</sup> e 3.375 MW em 1.687 km<sup>2</sup> nas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, respectivamente. A estimativa de geração eólica anual é de

16.792 GWh/ano, 64.726 GWh/ano e 140.255 GWh/ano nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m, para velocidades de vento acima de 6,0 m/s. Para velocidades acima de 7,0 m/s, a estimativa de geração eólica anual é de 847 GWh/ano, 3.756 GWh/ano e 9.386 GWh/ano, nas respectivas alturas de 50 m, 75 m e 100 m.

A Região Sul, de acordo com o Atlas Eólico Brasileiro de 2001, apresentava um potencial eólico acumulado de 22,76 GW para velocidades do vento de no mínimo 7,0 m/s a 50 m de altura, porém, como exposto anteriormente, esse potencial ultrapassará os valores estimados em 2001.

## 6.5.2 REGIME DOS VENTOS NA REGIÃO

Na Região dos Planaltos do Sul, o escoamento atmosférico geral é controlado pela Depressão do Nordeste da Argentina, uma área quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária ao leste dos Andes sobre planícies secas e o Anticiclone Subtropical Atlântico, sendo criada pelo bloqueio da circulação atmosférica geral pelos Andes e por intenso aquecimento da superfície na Região. Esse gradiente de pressão, entre a Depressão do Nordeste da Argentina e o Anticiclone Subtropical Atlântico Sul, induz um escoamento persistente de nordeste ao longo dessa área. Entretanto, esse escoamento é significativamente influenciado pelo relevo e pela rugosidade do terreno.

Ao longo do litoral sul as velocidades são maiores, devido aos ventos predominantes leste-nordeste serem acentuados pela persistente ação diurna das brisas marinhas.

## 6. CONCLUSÃO

Com este estudo pôde-se perceber o quanto o Brasil é favorecido em termos de ventos e, mesmo que alguns destes valores de potenciais eólicos, aqui apresentados, tenham sido estimados levando em consideração a tecnologia comercialmente utilizada em 2001, com medições da velocidade do vento a alturas de 50 m, a evolução da potência dos aerogeradores utilizados comercialmente e a altura das torres aumentaram consideravelmente, como pôde ser observado em estudos específicos de alguns estados brasileiros, fazendo com que o potencial nacional seja ainda mais promissor.

A Região Nordeste possui um excelente potencial eólico, superando abundantemente todas as outras quatro regiões nacionais, pois na mesma os ventos se caracterizam por apresentarem pequena variação de direção ao longo do ano, e essa persistência associada aos ventos intensos, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte, Alagoas e Ceará, revelam estas regiões como extremamente propícias para geração de energia eólica, e assim complementar a energia gerada pelas hidrelétricas, principalmente nos períodos de máxima demanda de energia e de estiagem, potencializando a confiabilidade e a estabilidade do Sistema Elétrico Brasileiro.

O território nacional brasileiro possui um excelente potencial eólico, porém, faz-se necessária a atualização destes estudos, com um mapeamento de todo o território, considerando alturas superiores a 100 metros e aerogeradores com potência acima de 1,5 MW. Também é importante, para uma identificação mais detalhada destes potenciais, a disponibilização dos dados coletados nos parques eólicos que já estão em pleno funcionamento, pois os mesmos não são utilizados nas pesquisas devido ao sigilo destas informações, tais como velocidade média e direção dos ventos, por parte dos consórcios detentores dos direitos comerciais de exploração desta forma de geração de energia elétrica.

Outro estudo necessário é o inventário mais completo do potencial eólico nacional *offshore*, que, apesar dos poucos estudos realizados, estima-se que este potencial seja superior ao potencial continental. Este tipo de exploração constitui-se em uma possibilidade futura de geração de energia, pois o Brasil possui um litoral com mais de 7 mil quilômetros de costa e o domínio da tecnologia avançada de construção de plataformas e exploração *offshore* de

petróleo e gás natural, que podem ser utilizadas na implantação de aerogeradores ao longo da costa marítima.

Por fim, pode-se concluir que a energia eólica encontra-se hoje em uma janela de oportunidades, pois a modularidade, a inesgotabilidade, a consolidação da tecnologia e da indústria eólica mundial, a rapidez de instalação em comparação com as hidrelétricas e termelétricas, a descentralização da geração, os custos de instalação cada vez menores, a baixíssima agressão ao meio ambiente e a utilização das áreas ocupadas pelas usinas eólicas, em conjunto com outras atividades, como a pecuária e a agricultura, qualificam a energia dos ventos como fonte energética que pode e deve ser utilizada em conjunto com o sistema de geração hidroelétrico brasileiro, principalmente nos períodos de estiagem, os quais possuem as melhores médias de velocidades dos ventos, alavancando assim o crescimento econômico e a autossustentabilidade energética do país.



## REFERÊNCIAS

**1º Anuário Brasileiro das indústrias de Biomassa e Energias Renováveis (2012/1013).**

Disponível em:

<[http://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario\\_biomassa\\_e\\_energias\\_renovaveis\\_2012/8?e=3524626/1672003](http://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovaveis_2012/8?e=3524626/1672003)>. Acesso em: 19 Jan. 2014.

**2º Anuário Brasileiro das indústrias de Biomassa e Energias Renováveis (2013/1014).**

Disponível em:

<[http://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario\\_biomassa\\_e\\_energias\\_renovav?e=3524626/5496897](http://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovav?e=3524626/5496897)>. Acesso em: 19 Jan. 2014.

ABEEÓLICA. **Boletim Mensal de Dados do Setor Eólico - Público**. Nº 01/2014. Disponível em: <[http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim\\_Dados-ABEEolica-Janeiro-2014-Publico.pdf](http://www.portalabeeolica.org.br/images/pdf/Boletim_Dados-ABEEolica-Janeiro-2014-Publico.pdf)>. Acesso em: 13 Fev. 2014.

ALDABÓ, R.. **Energia Eólica**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

AMARANTE, O. A. C.. **Atlas eólico**: Espírito Santo. Vitória: ASPE, 2009. 100p. Disponível em: <[http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/atlas\\_eolico\\_es.pdf](http://www.forumdeenergia.com.br/nukleo/pub/atlas_eolico_es.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

AMARANTE, O. A. C.. **Atlas eólico**: Minas Gerais. Belo Horizonte: Cemig, 2010. 84p.

Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlas\\_eolico\\_MG.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_MG.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

AMARANTE, O. A. C., et al. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília, 2001, 45 pp.

Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/Atlas%20do%20Potencial%20Eolico%20Brasileiro.pdf)>. Acesso em: 03 Jan. 2014.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 3ª edição, Brasília, 2008, 236p.

BURTON, T.; SHARPE, D.; NICK, J. **Wind Energy Handbook**. 1. ed. Londres: John Wiley & Sons, 2001.

COELBA. **Atlas do Potencial Eólico do Estado da Bahia**. Salvador, 2002, 61p. Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlas\\_eolico\\_BA.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_BA.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

CAMARGO, O. A. et al. **Atlas eólico do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: SEMC, 2002. 70p. Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlas\\_eolico\\_RS.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_RS.pdf)>.  
Acesso em: 09 Jan. 2014.

CAMARGO-SCHUBERT. **Atlas eólico: Bahia**. Salvador: SECTI, SEINFRA, CIMATEC/SENAI. 2013. 96p. Disponível em:  
<<http://www.seinfra.ba.gov.br/downloads/atlaseolicobahia2013.pdf>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

CAMARGO-SCHUBERT. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará**. Fortaleza: SEINFRA, 2002. Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/10\\_atlas\\_do\\_potencial\\_eolico\\_do\\_ceara.zip](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/10_atlas_do_potencial_eolico_do_ceara.zip)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

CAMARGO-SCHUBERT. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Rio Grande do Norte**. Natal – RN: COSERN, 2003. 47p. Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlas\\_eolico\\_RN.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_RN.pdf)>.  
Acesso em: 09 Jan. 2014.

CAMARGO-SCHUBERT. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro – RJ: SEINPE, 2002. 64p. Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/AtlasEolicoRJ.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

CASTRO, R. M. G. **Energias Renováveis e Produção Descentralizada: INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA**. 1. ed., 2001.

CE-EOLICA/PUCRS. **Perguntas Frequentes sobre Energia Eólica**. 2013. Disponível em:  
<<http://www.pucrs.br/ce-eolica>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

COPEL; LACTEC. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Paraná**. 2008. Disponível em:  
<[http://www.copel.com/download/mapa\\_eolico/Atlas\\_do\\_Potencial\\_Eolico\\_do\\_Estado\\_do\\_Parana.pdf](http://www.copel.com/download/mapa_eolico/Atlas_do_Potencial_Eolico_do_Estado_do_Parana.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

CRESESB/CEPEL. **Tutorial de Energia Eólica: Princípios e Tecnologias**. 2013. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_eolica.htm](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.htm)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

ELETROBRÁS; LACTEC; UFAL. **Atlas do Potencial Eólico do Estado de Alagoas**. Maceió, 2008, 54p. Disponível em:  
<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas\\_eolico/atlas\\_eolico\\_AL.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/atlas_eolico/atlas_eolico_AL.pdf)>.  
Acesso em: 09 Jan. 2014.

ELETRÔNICA. **Energia Eólica**. 2013. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/17/29/>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

ENERGÍAS RENOVABLES Y LIMPIAS: solar, eólica, geotérmica, hidráulica e mareomotriz. **¿Cómo generar energía eléctrica utilizando energía eólica?** El aerogenerador, diferentes tipos y su funcionamiento básico. 07 Ago 2012. Disponível em: <<http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com.br/2012/08/como-generar-energia-electrica-con-energia-eolica.html>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Funcionamento de um aerogerador**. Disponível em: <[http://aero-mini.blogspot.com.br/2009/11/funcionamento-de-um-aerogerador\\_27.html](http://aero-mini.blogspot.com.br/2009/11/funcionamento-de-um-aerogerador_27.html)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

ERICKSON, W. P.; JOHNSON, G. D.; YOUNG, D. P.. **A summary and comparison of bird mortality from anthropogenic causes with an emphasis on collisions**. USDA Forest Gen. Tech. Rep.. 2005,. Disponível em: <[http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf](http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

GIL, A.C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6º ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Atlas do Potencial Eólico do Estado de São Paulo**. São Paulo: SEE, 2012. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/385.pdf>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

GWEC; GREENPEACE. **WIND FORCE 12: A blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020**. Global Wind Energy Council, Jun. 2005. Disponível em: <[http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WF12/wf12-2005.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WF12/wf12-2005.pdf)>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

MORAES, E. C. **Energia eólica no Brasil**. 2004. Disponível em: <<http://www.gabeira.com.br>>. Acesso em: 19 Jan. 2014.

NUNES, H. M. P.. **Avaliação do potencial eólico ao largo da costa nordeste do Brasil**. 2012. 119 f., il. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

PORTAL DO PROFESSOR. **Energia Eólica e a presença da física – UCA**. 2013. Disponível em: <<http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=33006>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

Portal EcoDesenvolvimento.org. In: **Cientistas descobrem solução para evitar a colisão de pássaros contra moinhos de vento**. 05 Nov. 2010. Disponível em: <<http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/cientistas-descobrem-solucao-para-evitar-a-colisao>>. Acesso em: 09 Jan. 2014.

USP. **PEA 5002: Energia Eólica Fundamentos e Viabilidade Técnico-Econômica**. Disponível em: <<http://disciplinas.stoa.usp.br/mod/resource/view.php?id=41488>>. São Paulo, 2013. Acesso em: 09 Jan. 2014.

WIKIPÉDIA. **Energia eólica**. 2014. Disponível em: <[http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia\\_e%C3%B3lica](http://pt.wikipedia.org/wiki/Energia_e%C3%B3lica)>. Acesso em: 03 Jan. 2014.