



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

LEONARDO JORDÃO SOARES

**ENERGIA EÓLICA**  
**INSERÇÃO NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA**

Campina Grande, Paraíba  
Novembro de 2015

LEONARDO JORDÃO SOARES

ENERGIA EÓLICA: INSERÇÃO NA MATRIZ ELÉTRICA  
BRASILEIRA

*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:

Leimar de Oliveira, **M. Sc.**

Campina Grande, Paraíba  
Novembro de 2015

LEONARDO JORDÃO SOARES

# ENERGIA EÓLICA: INSERÇÃO NA MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA

*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

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

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

Dedico este trabalho à toda minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, pela minha vida e pelo dom da perseverança, que me permitiu concluir este trabalho.

Agradeço também a meu pai, Jose Soares da Silva, e minha mãe, Maria do Rosário Jordao Soares por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por ter me alimentado com saúde, força e coragem, as quais foram essenciais para superação de todas as adversidades ao longo desta caminhada, e também ao meu irmão Henrique Jose Jordao Soares.

A minha esposa Carla da Nobrega Siqueira Soares e ao meu filho Guilherme Jordao da Nobrega por sempre me receberem com muito carinho e amor depois de tanto tempo fora de casa e que era minha motivação diária.

A Secretária Adail, o Secretário Tchaikovsky e ao Coordenador Damásio Fernandes, pelos incentivos e apoios constantes.

Agradeço ao meu orientador, Leimar de Oliveira, pela paciência e tempo dedicado com sugestões.

Agradeço a todos meus amigos de graduação, que sempre me ajudavam e me apoiavam durante toda essa jornada.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Tudo o que um sonho  
precisa para ser realizado,  
é alguém que acredite que  
ele possa ser realizado.”*

Roberto Shinyashiki.

## RESUMO

O consumo de energia elétrica é um fator indispensável para o crescimento econômico de um país. Ultimamente se tem deparado com uma nova situação em que os recursos convencionais para a geração de energia elétrica ou se tornaram escassos ou as consequências de sua utilização passaram a ser discutidas pelo seu efeito negativo quanto às questões ambientais. Perante esta situação, propõe-se o desafio de fornecer, de forma segura, as necessidades energéticas intrínsecas ao progresso do crescimento econômico, com a utilização de fontes alternativas às tradicionais, com baixo impacto ambiental e a um preço de comercialização aceitável. Com isso, o emprego da energia eólica na geração de eletricidade tem sido considerado como uma das alternativas para a composição da matriz energética mundial e nacional. Portanto, este trabalho busca examinar como esta forma de energia está inserida no cenário elétrico brasileiro e quais as perspectivas do crescimento de seu uso no curto prazo diante da oferta de outras fontes de energia disponíveis no mercado. No Brasil, esta fonte energética segue uma tendência de crescimento significativa, retratando os planos do governo de diversificação da matriz energética através de incentivos em fontes alternativas de energia. Nos leilões de energia eólica de 2009 a 2011, foram contratados ao todo mais de 6,7 GW em empreendimentos eólicos que entrarão em operação até 2016, um fato notável e surpreendente considerando seu contexto histórico. As análises obtidas permitem afirmar que a energia eólica é hoje uma das fontes alternativas mais baratas e possui um alto poder competitivo entre todas as outras fontes de energia. Se este cenário for aprimorado com as reformulações apropriadas, a energia eólica terá um caminho ainda mais promissor e competitivo para uma maior consolidação na matriz energética brasileira.

**Palavras-chave:** Energia eólica. Geração de energia. Setor elétrico brasileiro. Matriz energética brasileira. PROINFA. Leilões de energia.

## ABSTRACT

The consumption of electricity is an essential factor for the economic growth of a country. Lately, we encounter a new situation in which the classic features for the generation of electricity or have become scarce or the consequences of its use began to be discussed by its negative effect on environmental issues. In view of this situation, it is proposed the challenge to safely provide the energetic needs that are intrinsic to the progress of economic growth, with the use of alternatives to traditional sources, with low environmental impact and an acceptable sales price. In this context, the use of wind energy for electricity generation has been considered as one of the alternatives to compose the global and national energy matrix. Thus, this paper seeks to examine how this form of energy is inserted in the Brazilian electricity scenario and which are the prospects of growth of its use in the short term considering the supply of other energy sources available in the market. In Brazil, the adoption of this energy source follows a trend of significant growth, portraying the government's plans to diversify the energy matrix through incentives for alternative energy sources. In energy auctions from 2009 to 2011, were engaged in all more than 6.7 GW of wind projects to come on stream by 2016, a remarkable and surprising fact, considering its historical context. The analyzes obtained allow us to state that wind power is now one of the cheapest alternative sources and has a high competitive power among all other energy sources. If this scenario is enhanced with the appropriate reformulations, wind energy will have a more competitive and promising path for a further consolidation in the Brazilian energy matrix.

**Keywords: Wind energy. Power generation. Brazilian electric sector. Brazilian energy matrix. PROINFA. Energy auctions.**

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estrutura típica de um moinho de vento (a) vista interior;(b) vista exterior.....	5
Figura 2. Turbinas eólicas. (a) Smith-Putnam (1941-1945) USA; .....	6
Figura 3. Aerogerador de Brush .....	8
Figura 4. Aerogerador de Poul la Cour.....	9
Figura 5. Turbina eólica Smith Putnam.....	11
Figura 6. Turbinas eólicas desenvolvida por Johannes Juul .....	12
Figura 7. Turbina eólica de Ulrich.....	13
Figura 8. Capacidade Eólica Global de 1997 à 2014: Instalada e Acumulada .....	15
Figura 9. 10 Principais países com novas capacidades instaladas em 2014 .....	16
Figura 10. 10 Principais países com capacidade acumulada em 2014.....	17
Figura 11. Capacidade anual instalada por região de 2006 à 2014.....	18
Figura 12. Capacidade acumulada global de energia eólica offshore.....	18
Figura 13. Distribuição de usinas instaladas e em construção no nordeste .....	21
Figura 14. Gráfico da sazonalidade e do regime dos ventos na região nordeste .....	23
Figura 15. Ilustração do potencial eólico em função da velocidade média dos ventos no Brasil (a) em 2001 pela ANEEL e (b) em 2010 pela EPE .....	24
Figura 16. Gráfico da matriz elétrica brasileira, em janeiro de 2014.....	26
Figura 17. Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Centro-Oeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude .....	27
Figura 18. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região nordeste, estimado em 2001, a 50m de altitude.....	30
Figura 19. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região norte, estimado em 2001, a 50 m de altitude .....	35
Figura 20. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região sudeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude.....	37
Figura 21. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região sul, estimado em 2001, a 50 m de altitude .	42

## 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  
Ceming – Companhia Energética de Minas Gerais S.A.  
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica  
CELPE – Companhia de Energia Elétrica de Pernambuco  
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.  
EMAE – Empresa Metropolitana de Águas e Energia  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética  
EUA – Estados Unidos da América  
GW – gigawatt  
GWEC - Global Wind Energy Council  
GWh – gigawatt-hora  
GWh/ano – giga watt-hora por ano  
IBENBRASIL – Iberdrola Empreendimentos S.A.  
Km – quilômetro  
Km<sup>2</sup> – quilômetro quadrado  
Km/h – quilômetro por hora  
KV – quilovolt  
KW – quilowatt  
L – Leste  
LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento  
m – metro  
m/s – metro por segundo  
MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia  
MTOI – M. Torres Olvega Industrial  
MW – megawatt  
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 Hidro meteorológico  
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  
UE – União Europeia  
UFAL – Universidade Federal de Alagoas  
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco  
UFRGS – Universidade Federal do rio grande do sul  
W – Oeste  
WWEA – Associação Mundial de Energia Eólica

# SUMÁRIO

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract .....	viii
Lista de Ilustrações .....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	x
Sumário .....	xii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo .....	2
1.2 Estrutura.....	2
2 História da energia eólica .....	4
2.1 Histórico Mundial .....	4
2.2 Histórico Brasileiro .....	7
2.3 Cronologia dos pioneiros da energia eólica .....	8
3 Panorama da energia eólica .....	14
3.1 Potencial elétrico Mundial .....	14
3.2 Potencial elétrico Brasileiro .....	20
4 Potencial eólico por região no Brasil.....	22
4.1 Região centro-oeste.....	27
4.1.1 Velocidade dos ventos e potencial na região .....	28
4.1.2 Regime dos ventos na região .....	28
4.2 Região nordeste.....	29
4.2.1 Velocidade dos ventos e potencial na região .....	30
4.2.2 Regime dos ventos na região .....	33
4.3 Região norte.....	34
4.3.1 Velocidade dos ventos e potencial na região .....	35
4.3.2 Regime dos ventos na região .....	36
4.4 Região sudeste .....	37
4.4.1 Velocidade dos ventos e potencial na região .....	38
4.4.2 Regime dos ventos na região .....	40
4.5 Região sul .....	41
4.5.1 Velocidade dos ventos e potencial na região .....	42
4.5.2 Regime dos ventos na região .....	44
5 Considerações finais.....	45
Bibliografia.....	47

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um elemento de suma importância para qualquer nação sendo a base de sustentação do desenvolvimento econômico e dos altos padrões de vida. Com o contínuo crescimento da população mundial, é de extrema importância que se diversifique as fontes de energia primária e se amplie num curto prazo de tempo, a eficiência dos sistemas de conversão de energia de modo a atender, de forma sustentada e também equilibrada, ao aumento de demanda de energia elétrica no futuro.

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

O Brasil foi o primeiro país na América Latina a instalar um aereogenerador, no início da década de 1990, mais precisamente em 1992. Este projeto foi possível graças a uma parceria entre o Centro Brasileiro de Energia Eólica (CBEE) e a Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), por meio de um financiamento do instituto de pesquisas dinamarquês Folkecenter. A turbina eólica de 75 kW foi então instalada em Pernambuco em 1992, em Fernando de Noronha, e chegou a gerar 10% da energia elétrica consumida na ilha, economizando 70.000 litros de diesel por ano, um feito impressionante para o Brasil na época. Alguns outros projetos, muitos deles em caráter experimental, foram realizados nos anos posteriores, nos estados de Minas Gerais, Ceará, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Paraná e Santa Catarina (ANEEL, 2008). Durante os dez anos seguintes, pouco se avançou na utilização 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 na época.

Em 2001, tinha uma estimativa de 143 GW a potência tecnicamente aproveitável do Brasil. O maior potencial eólico nacional se encontra na Região Nordeste. Atualmente,

um dos grandes desafios da humanidade é unir o útil ao sustentável, e é com este 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 cerca de 3% da matriz energética brasileira), representando 142% a mais do que a meta prevista de 2 GW.

Em 2015, está prevista a expansão de 6 gigawatts (GW) da capacidade instalada de energia eólica no Brasil. Isso fará que o país passe a ocupar a segunda posição em expansão de energia eólica no mundo, atrás apenas da China, e superando até a Alemanha.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é analisar a inserção da energia eólica na matriz elétrica brasileira, mostrar sua expansão que vem ocorrendo durante os últimos anos no Brasil e também analisar seu desenvolvimento no mundo.

## 1.2 ESTRUTURA

Este trabalho está dividido em cinco capítulos.

Este, o primeiro capítulo, apresenta uma visão geral sobre os temas abordados no trabalho, onde mostra-se um breve histórico da energia eólica e como ela está inserida no Brasil e sua evolução durante as últimas décadas, mostrando sua expansão durante os anos, apresentando também a quantidade de parques eólicos construídos e onde a energia eólica apresenta um maior potencial nacional.

No segundo capítulo será apresentado a história da energia eólica, tanto mundialmente como no Brasil, mostrando as primeiras utilizações da energia eólica e como ela vem evoluindo gradativamente. Neste capítulo são apresentadas as primeiras turbinas eólicas como eram utilizadas e suas evoluções durante vários anos e onde era principalmente utilizada. Já no Brasil é apresentado um breve histórico mostrando onde foi instalada a primeira turbina eólica do Brasil e mostrando como vem sendo desenvolvida a energia eólica durante os anos no Brasil. Além disso mostra-se a

cronologia dos pioneiros da energia eólica onde e mostrado os primeiros engenheiros e cientistas que utilizaram o vento como forma de energia.

No terceiro capítulo será apresentado um panorama geral da situação atual da energia eólica, no mundo e, no Brasil, em termos de crescimento nos últimos anos e capacidade instalada atual, onde pode-se ver os dados atualizados de como a energia eólica vem sendo utilizada atualmente em comparação com as outras fontes de energia e além disso mostra o porquê da energia eólica vem crescendo tanto durante os anos, onde e apresentado fatores determinantes para sua utilização.

No quarto capítulo, será apresentado, 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 cinco serão feitas considerações finais sobre o estudo, levando-se em consideração tudo que foi apresentado mostrando o quanto a energia eólica vem crescendo no mundo e no Brasil, mostrando uma perspectiva futura, e os desafios que o Brasil tem que superar para ampliar e desenvolver ainda mais o setor eólico brasileiro e por fim, têm-se as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa.

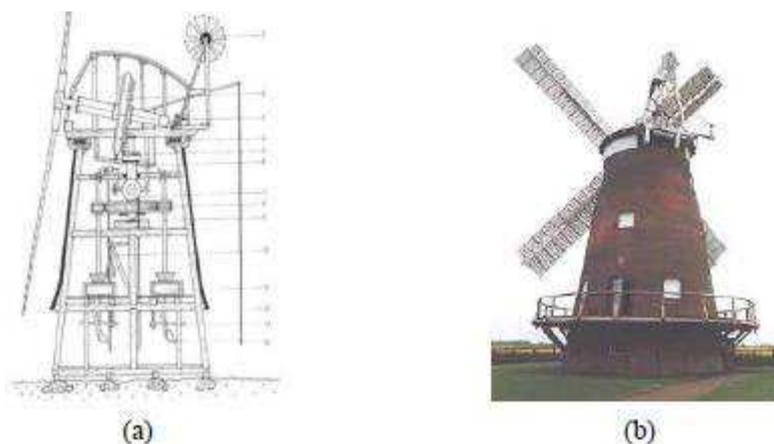
## 2 HISTÓRIA DA ENERGIA EÓLICA

### 2.1 HISTÓRICO MUNDIAL

As primeiras utilizações da força dos ventos pelo homem não têm uma data específica, porém, acredita-se, que ocorreram há milhares de anos, no Oriente. Tem-se estimado que a partir da Idade Média o homem tem utilizado em maior escala as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo assim as grandes navegações e também maior eficiência nas máquinas eólicas. Provavelmente, máquinas eólicas movidas por forças de sustentação talvez tenham sido introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI. Sabe-se que no século XIV, na Holanda, essas máquinas já tinham grande evolução técnica e de capacidade em potência e uma grande utilização como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água. Em meados da descoberta do Brasil, em 1500, existiam milhares de moinhos de vento em toda a Europa. Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram uma significativa expansão, na sua aplicação na Europa: em fabricação de papel para atender à sua demanda após a invenção da imprensa, na produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem. Com a grande expansão do uso de máquinas a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram aos poucos em desuso. A utilização de cata-ventos de múltiplas pás destinados ao bombeamento d'água desenvolveu-se de forma significativa, em vários países, principalmente nas áreas rurais. Estima-se que desde a segunda metade do século XIX, entornos de seis milhões de cata-ventos já haviam sido fabricados e também instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento d'água em sedes de fazendas e para abastecimento de bebedouros para o gado. Os cata-ventos de múltiplas pás foram utilizados também em algumas outras regiões como a Austrália, Rússia, África e América Latina. O sistema se adequou muito bem às condições rurais por causa de suas características de fácil operação e manutenção. A estrutura era feita de metal e o sistema de bombeamento era feito através de bombas e pistões favorecidos pelo alto torque fornecido pelo grande número de pás. Até nos dias de hoje

esse sistema é largamente utilizado em várias partes do mundo para o bombeamento d'água.

FIGURA 1. Estrutura típica de um moinho de vento (a) vista interior;(b) vista exterior.



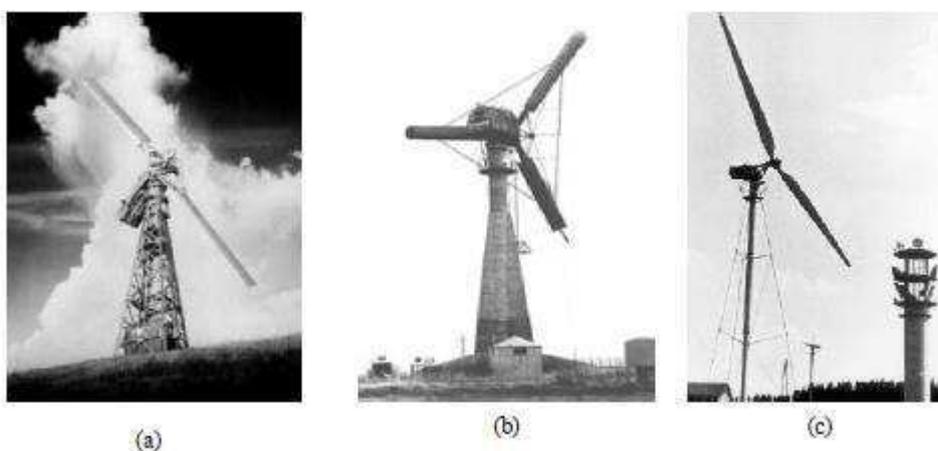
Fonte: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - Cepel

Para a geração de energia elétrica, nos Estados Unidos, na década de 1930, iniciou-se uma grande utilização de pequenos aero geradores para o carregamento de baterias, o que ajudou o acesso à energia elétrica aos habitantes da zona rural. Entre 1930 e 1960, milhares desses aero geradores foram então produzidos e instalados nos Estados Unidos, e também exportados para diversos países. A produção dessas máquinas foi desativada aos poucos nas décadas de 1950 e 1960, na medida que as redes de eletrificação passaram a dominar no atendimento rural.

A geração de eletricidade em ampla escala, para fornecer de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é uma tecnologia que existe há diversas décadas. Desde a fase de experimentos, ressaltam-se que os primeiros aproveitamentos eólico-elétricos foram realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e Dinamarca (Gedser). Pode-se dizer então que o

precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha (Hütter, 1955), já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta.

FIGURA 2. Turbinas eólicas. (a) Smith-Putnam (1941-1945) USA;  
(b) Gedser (1977-1979) Dinamarca;  
(c) Hütter (1955) Alemanha.



Fonte: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica - Cepel

Em meados da década de 1970 e até a década de 1980, após a primeira grande crise de preços do petróleo, diversos países, incluindo o Brasil, aumentaram seus esforços e estudos em pesquisa sobre utilização da energia eólica para a geração elétrica. Nesta época a turbina DEBRA 100kW, foi feita em conjunto entre os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil e da Alemanha (DEBRA = DEutsche BRAsileira).

No entanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, onde foram feitas na Califórnia (na década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólico-elétrico atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economia.

## 2.2 HISTÓRICO BRASILEIRO

Foi instalada a primeira turbina de energia eólica no Brasil em 1992 no arquipélago de Fernando de Noronha. Depois disto somente dez anos depois, o governo criou o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica(Proinfa) no qual tinha o objetivo de incentivar a utilização de outras fontes renováveis, como eólica, biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas(PCHs). No Brasil foi realizado o seu primeiro leilão de energia eólica em 2009, em um movimento para diversificar a sua matriz de energia elétrica.

Então desde a criação do Proinfa, a produção de energia eólica no Brasil teve um aumento de 22 MW em 2003 para 602 MW em 2009, e cerca de aproximadamente 1000 MW em 2011(quantidade suficiente para abastecer uma cidade de aproximadamente cerca de 400 mil residências). Considerando o potencial eólico instalado e os projetos em construção para entrega até 2013, o país atingiu no final de 2013 a marca dos 3600 MW. Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás, o território brasileiro tem capacidade para gerar mais de 140 GW.

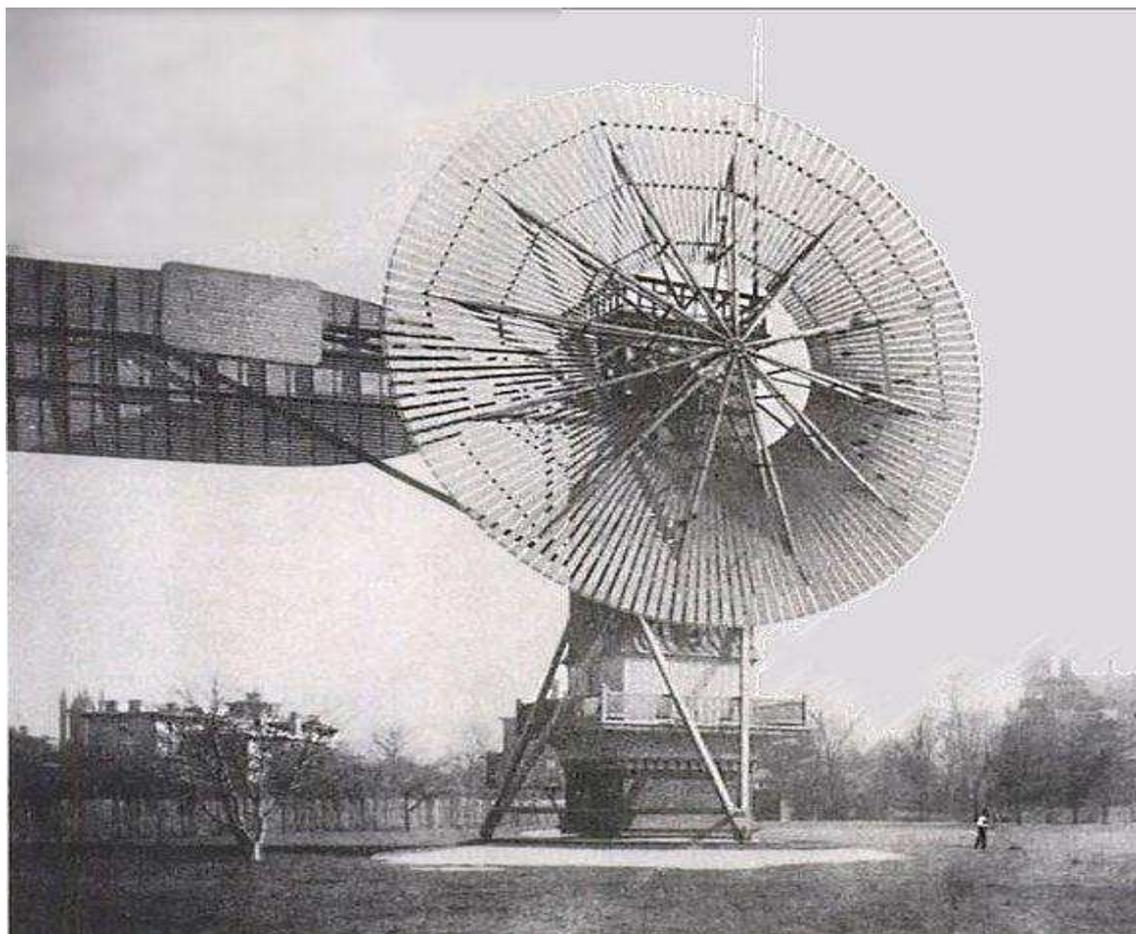
O potencial brasileiro de energia eólica é mais intenso de junho a dezembro, coincidindo com os meses de menor intensidade de chuvas, ou seja, nos meses em que falta chuva é exatamente quando venta mais. Então com isso coloca o vento como uma grande fonte complementar à energia gerada por hidrelétricas, a maior fonte de energia elétrica do país atualmente. Durante este período pode-se preservar as bacias hidrográficas fechando ou minimizando o uso das hidrelétricas. O melhor exemplo disto é na região do Rio São Francisco. Por essa razão, esse tipo de energia é excelente contra a baixa pluviosidade e a distribuição geográfica dos recursos hídricos existentes no país.

A maior parte dos parques eólicos se concentra nas regiões nordeste e sul do Brasil. No entanto, quase todo o território nacional tem potencial para geração desse tipo de energia.

## 2.3 CRONOLOGIA DOS PIONEIROS DA ENERGIA EÓLICA

**Charles F. Brush (1849-1929)**, foi o inventor do primeiro aro gerador automático. Em 1888, ele construiu um tipo de moinho gigante no qual deu o nome de moinho gigante de Brush, onde ficou reconhecido como a primeira turbina de vento de funcionamento automatizado para produção elétrica. O moinho possuía um rotor com um diâmetro de 17 metros (o maior do mundo na altura) e 177 lâminas feitas de madeira de cedro. No entanto, apesar do seu tamanho, a máquina só tinha uma potência de 12 KW, não conseguindo uma grande eficiência energética. Brush foi um dos fundadores da indústria elétrica norte-americana. A turbina funcionou durante 20 anos e alimentava as baterias da casa de Brush.

Figura 3. Aero gerador de Brush



Fonte: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Cepel

**Poul la Cour (1846-1908)**, Nos anos 80 do século XIX, Poul La Cour começou a desenvolver a ideia de utilizar moinhos de vento para produzir energia zonas rurais. La Cour retoma o projeto, construindo o seu primeiro moinho experimental em 1891 e no qual tem apoio financeiro por parte do governo dinamarquês. Para conseguir usar a força do vento e conseguir alimentar um gerador, La Cour desenvolve um regulador diferencial (chamado “Kratostato”) que passa a permitir o fornecimento de uma potência constante ao mesmo. Este sistema será posteriormente simplificado e utilizado nos aero geradores de vários países escandinavos e da Alemanha.

As experiências de Poul La Cour no campo da aerodinâmica, nas quais ele utilizava túneis de vento para otimizar as condições de força e de direção do vento, levaram a ele a desenvolver novos desenhos de hélices eólicas. Este cientista chega a conclusões gerais que ainda hoje são aceites: Para produzir a máxima energia possível numa determinada área ocupada por uma hélice, os braços dessa hélice devem ser poucos (tal como a inclinação da cunha destes) e a sua velocidade de rotação deve ser rápida. Embora não tenha sido o primeiro homem a desenvolver um moinho de vento capaz de produzir eletricidade (pertencendo essa honra ao americano Charles F. Brush), pelo seu pioneirismo e pelos estudos desenvolvidos na área de aerodinâmica, Poul La Cour deve ser considerado como um dos pais dos modernos aero geradores.

Figura 4. Aero gerador de Poul la Cour



Fonte: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Cepel

**Albert Betz (1885-1968)**, Físico e engenheiro alemão da escola de Prandtl ele nasceu em Schweinfurt, como diretor e pesquisador do laboratório trabalhou com máquinas de fluidos e marcou passagem com importante notoriedade, além de ter sido um dos pioneiros da tecnologia da energia eólica. Formado em engenharia (1911), passou a trabalhar como um investigador do fluxo no Aerodynamischen Versuchsanstalt, o laboratório de pesquisas aerodinâmicas de Göttingen. Concebeu a física dos rotores do vento de acordo com critérios científicos e pôs com seu trabalho as bases teóricas para sua aerodinâmica e fabricação de turbinas de transformação de energia eólica (1920). Criou a lei de Betz (1925), demonstrando que o desempenho máximo de uma turbina eólica é de 59,3%. Tornou-se Professor em Göttingen (1926) e trabalhou (1936-1956) na equipe de pesquisadores formada pelo professor Ludwig Prandtl (1875-1953), tornou-se um dos seus sucessores e também foi diretor do laboratório aerodinâmico do Max-Planck-Institut de Göttingen. Pesquisou junto com Ludwig Bölkow sobre túnel de vento para a companhia Messerschmitt (1939), em um projeto para desenho de asas de avião, resultando um trabalho especial sobre as bases teóricas para a teoria da asa. Foi honrado com a Carl-Friedrich-Gauß-Medaille (1965) e morreu em Göttingen, aos 83 anos de idade. A sua teoria sobre o design das pás continua ainda hoje a ser a base da construção dos equipamentos.

**Palmer Cosslett Putnam (1910-1986)**, engenheiro norte-americano, desenvolveu a primeira turbina eólica de grande escala de 1,25 MW Smith Putnam no ano de 1941, na qual daria para fornecer energia a uma vila, que funcionou até 1945 e foi encerrada devido a danos nos materiais de construção. Os materiais modernos e os padrões de qualidade utilizados atualmente ainda não haviam sido desenvolvidos. Os materiais e a qualidade necessários para estas dimensões ainda não existiam.

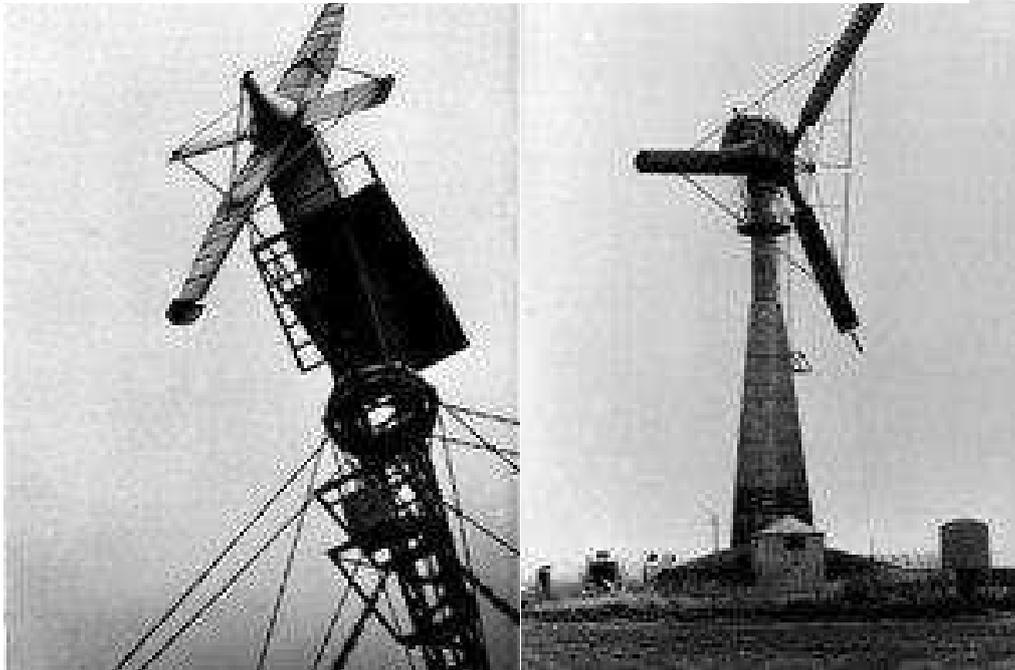
Figura 5. Turbina eólica Smith Putnam



Fonte: <http://www.integener.com/SABTSKManuscript/Chapter06.htm>

**Johannes Juul (1887-1969)**, engenheiro dinamarquês. Aluno de Poul la Cour. Construiu a primeira turbina eólica do mundo (200kW) para produção de corrente alternada na Dinamarca em Vester Egesborg, em 1957. Esta turbina é o protótipo das turbinas eólicas modernas.

Figura 6. Turbinas eólicas desenvolvida por Johannes Juul



Fonte: <http://guidedtour.windpower.org>

**Ulrich W Hüttner (1910-1990)**, As turbinas eólicas de Ulrich Huttner foram as pioneiras na indústria de turbinas eólicas alemã e operou por volta de 1957. Ulrich Huttner desenvolveu uma série de projetos, de eixo horizontal avançados de tamanho intermediário tipo aerofólio e lâminas de plástico com passo variável para proporcionar leveza e alta eficiência. A sua turbina 100 kW StGW-34, instalada em 1957 num campo experimental nos Alpes Suábios, é considerada um dos marcos da tecnologia de energia eólica moderna.

Figura 7. Turbina eólica de Ulrich



Fonte: Centro de Pesquisa de Energia Elétrica – Cepel

## 3 PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA

### 3.1 POTENCIAL ELÉTRICO MUNDIAL

A busca por novas fontes de energia, tanto pelo elevado preço dos derivados do petróleo quanto pela preocupação com a poluição, e pela dependência do petróleo importado, fez com que países desenvolvidos, como a Estados Unidos, Dinamarca, Holanda, Alemanha e Suécia, se tornassem os pioneiros na utilização da tecnologia dos sistemas eólicos, com importante crescimento nos anos 80. O alto custo da produção de energia, junto com as vantagens da energia eólica como fonte de energia renovável, amplamente disponível, tem levado vários países a estabelecer incentivos reguladores e direcionar investimentos para estimular a geração de energia eólica.

A Dinamarca é considerada a pioneira na tecnologia de turbinas modernas, sendo que foi a primeira a fornecer energia elétrica a partir de energia eólica no ano de 1891, projeto criado pelo professor Paul la Cour. Um importante ícone que demonstra a razão da Dinamarca ter sido líder nesse ramo é o grupo Vestas, uma das empresas do segmento de maior importância global e que emprega mais de 20.800 funcionários e tem como retorno seis bilhões de euros – dados de 2008 (Quaschnig, 2008).

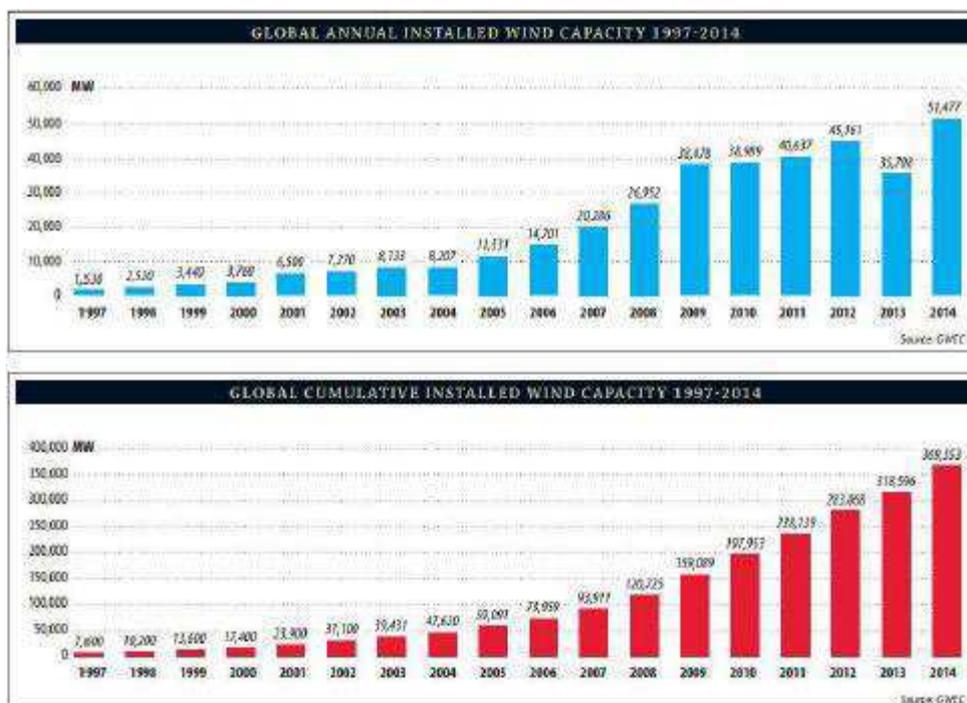
Os dois últimos estudos da World Wind Energy Association (WWEA) mostram um crescimento no uso de energia eólica no mundo. Os trabalhos, que avaliaram os anos de 2010 e o primeiro semestre de 2011 mostram que, ao todo, 86 países já utilizam essa fonte renovável para produzir eletricidade. Entre esses países, está a China, que se tornou o país com a maior capacidade instalada, acrescentando 18.928 Megawatt (MW) em sua matriz, em um ano, bem como o centro da indústria eólica internacional.

Em 2005 a Alemanha liderou o ranking dos países produtores de energia através de energia eólica, mas em 2008 foi superado pelos EUA. Então desde 2010, a China foi o maior produtor de energia eólica. Em 2011, o total instalado neste país ultrapassou 62.000 MW (62 GW). Comparado com o de 44.000 GW até 2010, houve um aumento de 41%. Em 2013, a capacidade de geração de energia eólica no mundo cresceu de 283GW, no fim de 2012, à 318GW, liderados por China e Canadá. Este crescimento é inferior ao apresentado no ano anterior. O acréscimo de 35GW representa um aumento de 12,4% em potência instalada. Destes 35GW de crescimento, a China foi responsável por instalar

16GW em seu território. O governo chinês tem o compromisso de atingir 200GW de potência instalada até 2020, e, em 2013 já possui 91,4GW. O conselho global de energia eólica – GWEC – se posicionou otimista em relação ao ano de 2014, com a previsão de serem ultrapassados os níveis de crescimento de 2012. Com isso, a China e os EUA representam 47,94% da capacidade eólica instalada global.

De acordo com os dados preliminares recolhidos pela WWEA, o ano de 2014 trouxe um novo recorde em instalações de energia eólica: mais de 50 GW de capacidade foram adicionados durante o ano de 2014, elevando a capacidade total de energia eólica perto de 370 GW. O volume de mercado para a nova capacidade eólica foi de 40% maior do que em 2013, e significativamente maior que o recorde do ano anterior, onde foram instalados 44,6 GW. Na **Figura 8** pode-se analisar a capacidade eólica mundial instalada e acumulada.

FIGURA 8. Capacidade Eólica Global de 1997 à 2014: Instalada e Acumulada



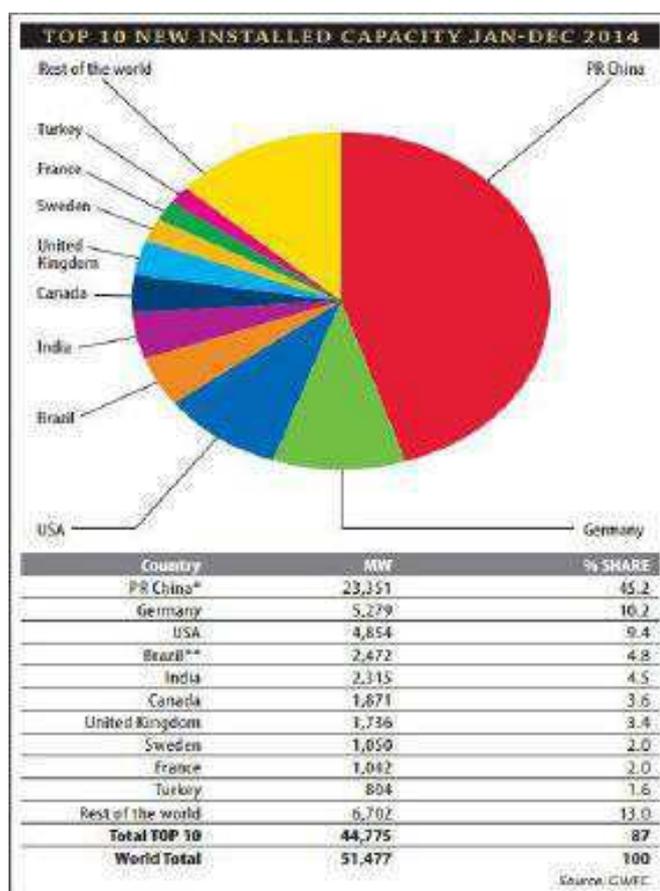
Fonte: <http://www.gwec.net/>

O grupo dos 12 principais países da lista instalaram sozinhos 44,8 GW de novas usinas de energia eólica, a metade deles estabelecendo novos recordes nacionais como a China, que adicionou 23,3 GW, o maior número de um país já adicionou dentro de um

ano, atingindo uma capacidade total de 115 GW. A Alemanha tornou-se o segundo maior mercado para novas turbinas, acrescentando onshore e offshore de 5,8 GW. O mercado norte-americano recuperou de sua queda anterior e chegou a 4,9 GW.

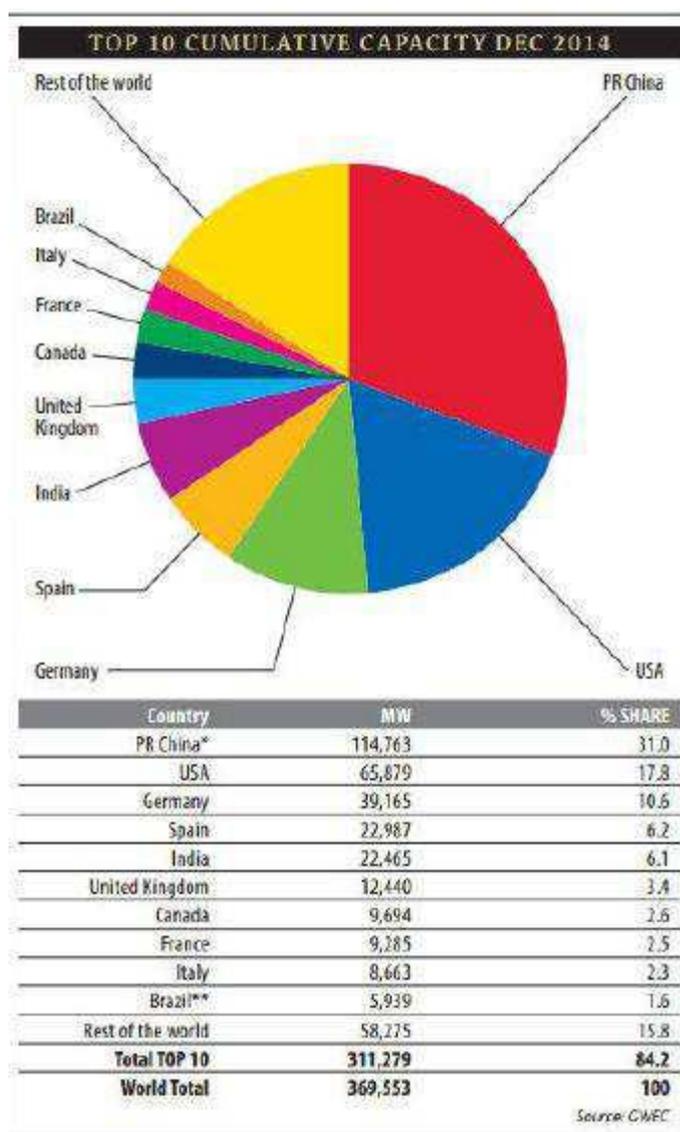
A novidade do ano ficou por conta do Brasil como recém-chegado do ano de 2014, com capacidade adicional de 2,8 GW, a primeira vez que um país latino-americano chegou a tal Figura. Novos registros nacionais de instalação também foram alcançados no Canadá (1,9 GW) e Suécia (1 GW). Dinamarca estabeleceu um novo recorde mundial ao atingir uma quota de energia eólica de 39% no fornecimento de energia doméstica. Entre os 12 maiores países, Espanha, Dinamarca e Itália permaneceram com os mesmos números apresentando estagnação em relação à novas instalações. A **Figura 9 e Figura 10** listam os 10 principais países em relação a maior capacidade instalada e capacidade acumulada entre Janeiro à Dezembro de 2014.

FIGURA 9. 10 Principais países com novas capacidades instaladas em 2014



Fonte: <http://www.gwec.net/>

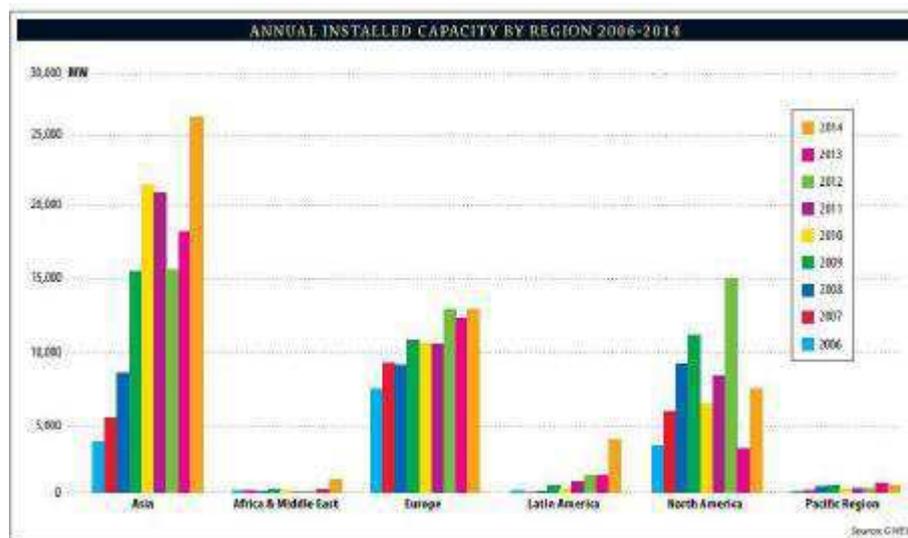
FIGURA 10. 10 Principais países com capacidade acumulada em 2014



Fonte: <http://www.gwec.net/>

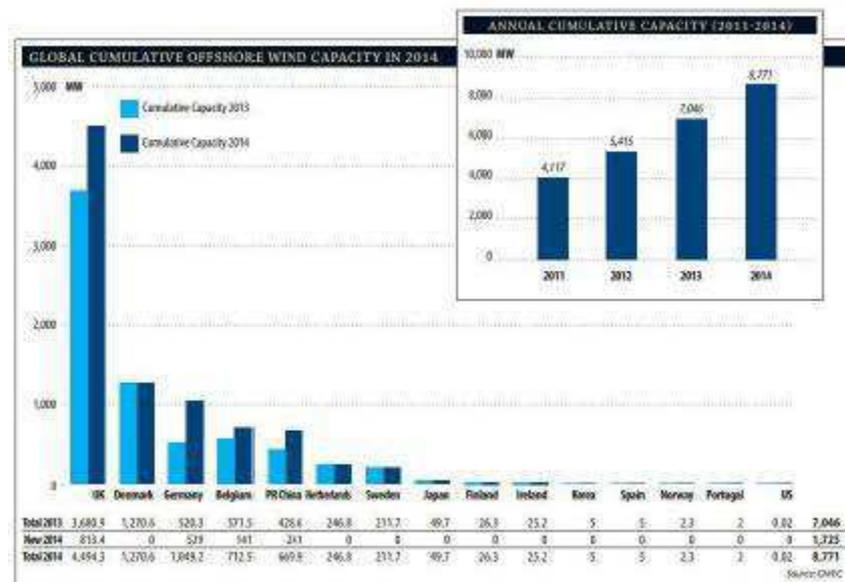
A energia eólica é hoje um pilar indiscutível do fornecimento de eletricidade em muitas partes do mundo. 370 Giga watt de energia eólica instalada em todo o mundo podem agora contribuir perto de 5% da demanda mundial de eletricidade. Vários países, incluindo a Dinamarca, Espanha, Portugal, Irlanda, Reino Unido e Alemanha, já atingiram 10% ou mais do seu poder que vem do vento. Na **Figura 11**, é possível observar a distribuição de capacidade anual instalada por região desde o ano 2006 até o final de 2014. A **Figura 12** ilustra dados relativos a geração de energia eólica offshore.

FIGURA 11. Capacidade anual instalada por região de 2006 à 2014



Fonte: <http://www.gwec.net/>

FIGURA 12. Capacidade acumulada global de energia eólica offshore.



Fonte: <http://www.gwec.net/>

Esse aumento da participação da energia eólica no mundo está relacionado a vários fatores. Entre eles está a necessidade dos países poderem contar com uma fonte de energia segura. Além disso, o custo da instalação é decrescente e é isenta de emissões de CO<sub>2</sub> e de outros gases poluentes, além dos menores efeitos secundários sobre o meio ambiente. É crescente a demanda global por energia. Espera-se que a demanda de energia global (e emissões de CO<sub>2</sub> correspondente) aumentará em 60% até 2030. O consumo

global de petróleo aumentou 20% desde 1994, e prevê que a demanda global de petróleo cresça 1,6% ao ano. Os preços de petróleo e gás estão aumentando. Quase duplicou na UE ao longo dos últimos dois anos, e preços da eletricidade têm seguido essa tendência. Isto é difícil para os consumidores. Com o aumento da demanda global por combustíveis fósseis, os preços elevados de petróleo e gás são susceptíveis a essa demanda. Pode, no entanto, desencadear um aumento da eficiência energética e inovação no setor.

A Europa ainda não desenvolveu mercados energéticos plenamente competitivos. Apenas quando estes mercados existirem é que os cidadãos e empresas da UE possam desfrutar de todos os benefícios da segurança fornecimento e preços mais baixos. Para atingir este objetivo, devem ser desenvolvidas interconexões, estabelecidos e totalmente implementado na prática quadros legislativos e regulamentares eficazes, e devem ser aplicadas estritamente as regras de concorrência da UE. Além disso, a consolidação do setor de energia deve ser orientada para o mercado, se a Europa a responder com sucesso a esses muitos desafios que enfrentam e investir adequadamente para garantir o futuro da energia eólica.

Esta é a nova paisagem energética do século XXI, em que as regiões econômicas do mundo dependem uns aos outros para garantir a segurança energética e as condições econômicas estáveis e desenvolver uma ação efetiva contra a mudança climática. No cenário atual temos o crescimento do setor de energia eólica, na China está sufocada por um acesso insuficiente a ligação à rede, enquanto um cenário de desaceleração parece ter voltado para os EUA, como resultado da incerteza sobre a validade de programas de incentivo. Na Alemanha e na Itália, os cortes tarifários e desafios relacionados com a ligação à rede de energia têm reduzido a atratividade no curto prazo, enquanto o fim de um importante benefício fiscal na Índia deve afetar o crescimento do setor eólico este ano. Por outro lado, muitos países, incluindo México e Chile anunciaram novas metas para a geração de energia limpa ou reafirmaram o apoio do governo por meio de incentivos. No entanto, a potência eólica instalada no mundo vai crescer significativamente nas próximas décadas e será uma parte importante da carteira de energias renováveis em muitos países.

### 3.2 POTENCIAL ELÉTRICO BRASILEIRO

A energia eólica atualmente é a fonte que mais cresce no Brasil. Na primeira semana do mês de janeiro em 2014, a energia eólica atingiu a marca de 6 Giga watts (GW) de potência instalada e uma participação de 4,5% na matriz elétrica brasileira.

Com o funcionamento de quatro novos parques eólicos na Bahia, essa fonte renovável começa o ano de 2014 com 241 parques eólicos distribuídos por onze estados.

No final do ano de 2012, o Brasil tinha uma capacidade aproximadamente de 2,5 GW instalada. Em apenas dois anos, a potência instalada do país mais que duplicou com a instalação de 3,5 GW. O ano de 2014 terminou com aproximadamente 195 usinas eólicas em operação comercial, 105 a mais do que no ano anterior. Já o fator de capacidade média das usinas brasileiras foi de 39% em dezembro, com destaque para a produtividade de parques no Piauí (73%) e Ceará (52%). Os fatores de capacidade apresentados no período adquirem especial relevância quando comparados com os valores médios verificados em 2013, nos países com maior capacidade eólica instalada, como China (23,7%), Estados Unidos (32,1%), Alemanha (18,5%) e Espanha (26,9%). A maior geração por estado foi a do Rio Grande do Norte, com 60 usinas que registraram 633 MW médios. Em seguida aparecem o Ceará (621 MW médios, 41 usinas) e Bahia (328 MW médios, 33 usinas). Em capacidade instalada, o ranking também é liderado por Rio Grande do Norte (1.723 MW), com Ceará (1.201 MW), Bahia (842 MW), Rio Grande do Sul (715 MW) e Santa Catarina (222 MW) em destaque. Na **tabela 1** são observados os 6 estados que mais receberam usinas eólicas até 2014.

**Tabela 1**

ESTADO	RN	BA	RS	CE	PI	SE
UNIDADES	25	22	17	15	3	1
MW	718,2	527,2	382	398,4	75,6	34,5
RS	2,9 Bi	2,1 Bi	1,9 Bi	1,6 Bi	225 Mi	103 Mi

Fonte: “Próprio autor”

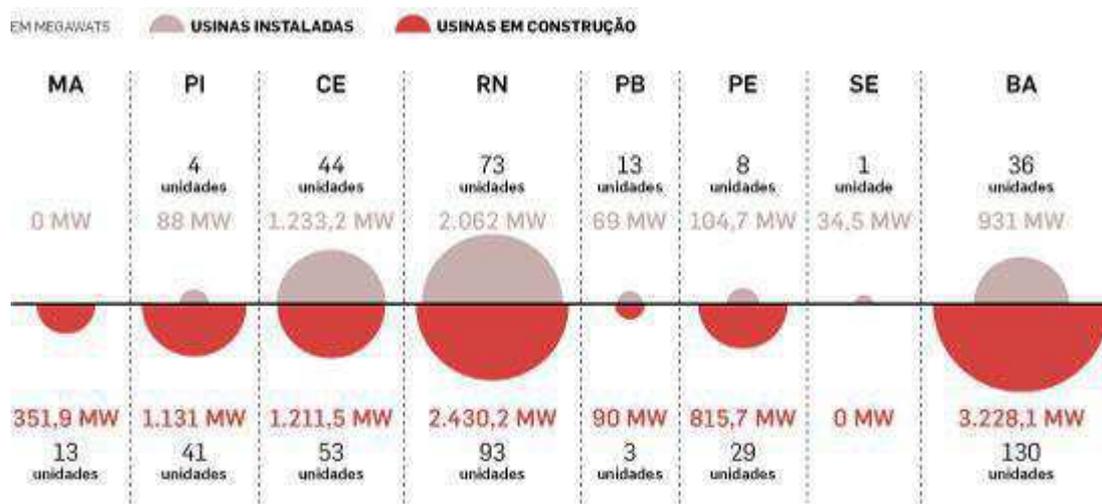
Devido à burocracia para a instalação dos parques eólicos e a falta de atualização do mapa eólico no qual dificultou muito a sua implementação, o Ceará tem 36 parques atrasados, segundo os relatórios da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Desse total de parques eólicos, 22 parques já deveriam estar funcionando desde janeiro,

enquanto os outros 14 parques seriam entregues ao longo de 2015, mas tiveram a conclusão adiada.

O aumento da capacidade instalada de energia eólica em 2014 ocorreu principalmente no Nordeste, com um crescimento de 174%, partindo de 1.451 MW e alcançando os 3.969 MW, provenientes de 156 usinas. O montante representa 80% da capacidade total de usinas eólicas do País. Os números colocam o Brasil na 11ª posição entre os países com maior capacidade instalada no mundo, de acordo com dados do Conselho Global de Energia Eólica (GWEC, na sigla em inglês), pouco à frente de Portugal e Dinamarca. Quando observada a expansão anual, o País registrou a 4ª colocação entre os que mais colocaram Mega watts eólicos em operação, com 2.764, atrás apenas de China, Alemanha e Estados Unidos. A geração eólica brasileira em dezembro de 2014 alcançou 1.908 MW médios.

Acreditasse que até 2018, é que a participação da energia eólica na matriz energética brasileira salte para 8%, com a contratação e instalação de no mínimo 2 GW de potência a cada ano. Pelas perspectivas do Governo, a eólica deve atingir 22,4 GW de potência instalada em 2023, e as previsões do setor indicam um crescimento ainda maior, que alcança 25,6 GW. Esses 6 GW representam para o país mais de 90 mil empregos gerados, 10 milhões de residências abastecidas mensalmente e 5 milhões de toneladas de emissões de CO2 evitadas. Abaixo, a **Figura 13** ilustra a distribuição de usinas eólicas tanto instaladas como em construção no nordeste brasileiro em 2015.

FIGURA 13. Distribuição de usinas instaladas e em construção no nordeste



Fonte: <http://economia.estadao.com.br/>

## 4 POTENCIAL EÓLICO POR REGIÃO NO BRASIL

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.

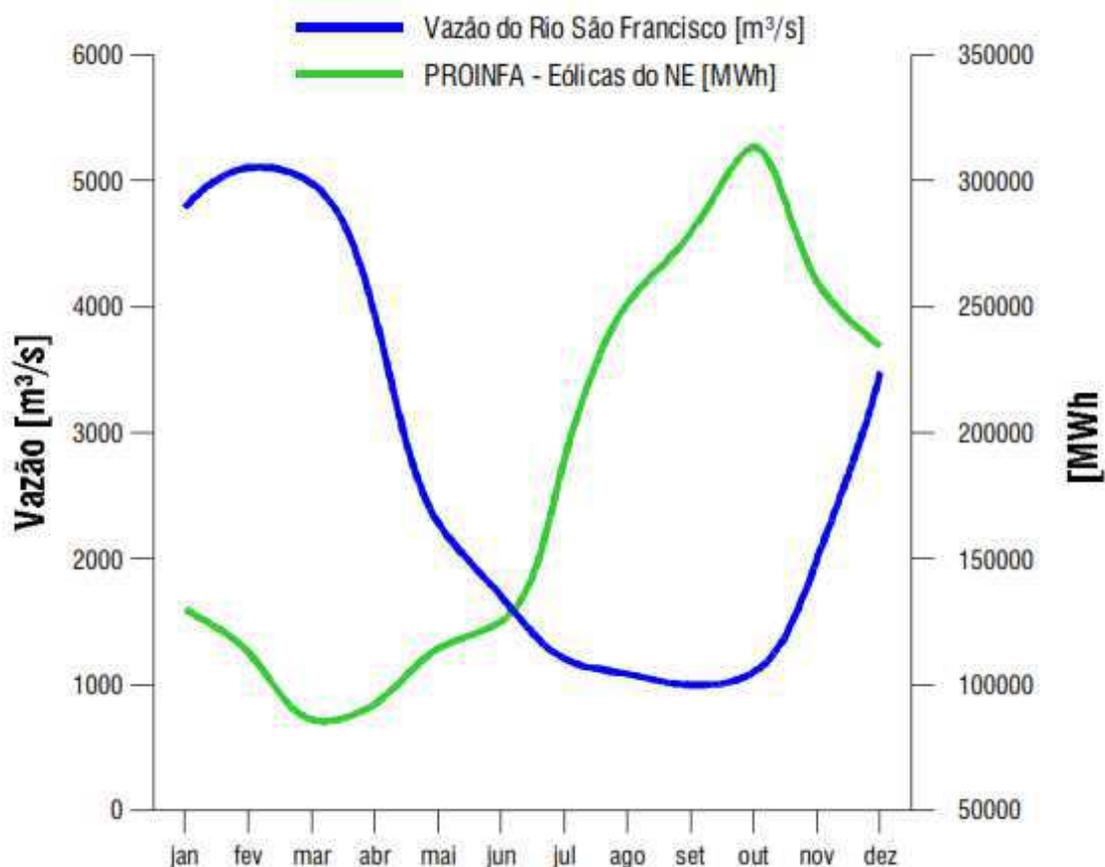
A partir destes dados são elaborados Atlas Eólicos que propiciam uma avaliação rápida do potencial eólico de uma determinada Região e permitem comparar o recurso eólico existente em várias áreas de interesse e, assim, definir se o local avaliado tem potencial promissor para desenvolvimento de parques eólicos, ou se o potencial deve ser aproveitado com pequenos e micros aero geradores 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 14.

FIGURA 14. Gráfico da sazonalidade e do regime dos ventos na região nordeste

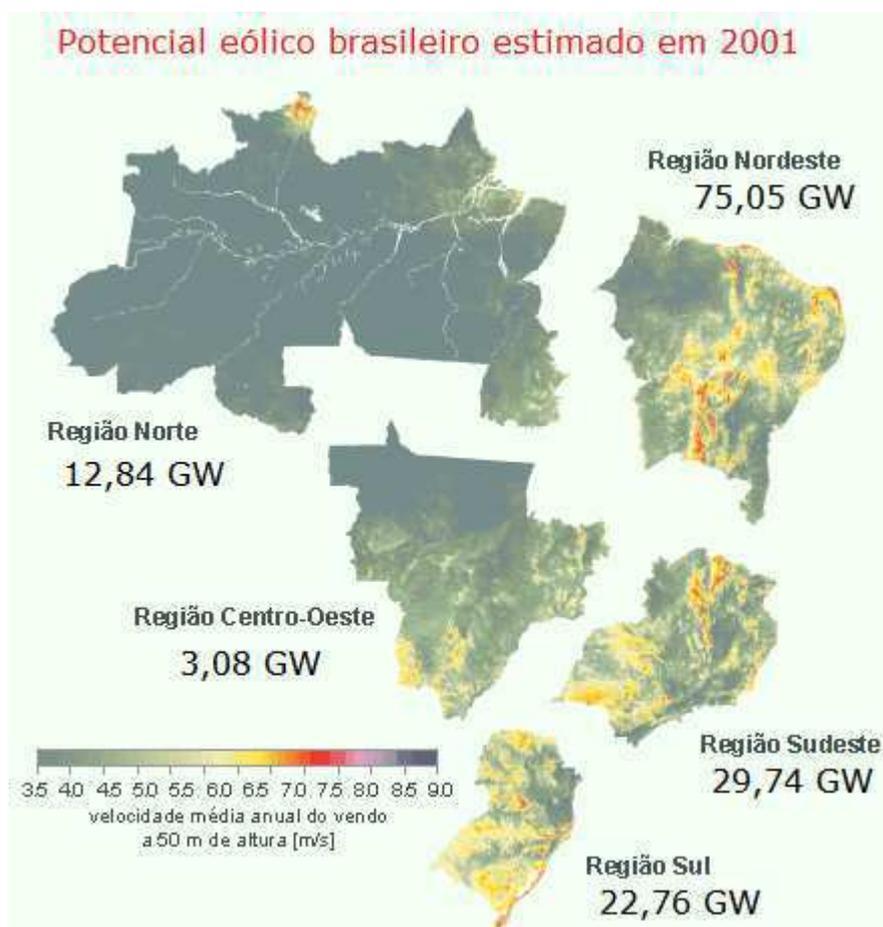


Fonte: ELETROBRÁS; LACTEC; UFAL, 2008.

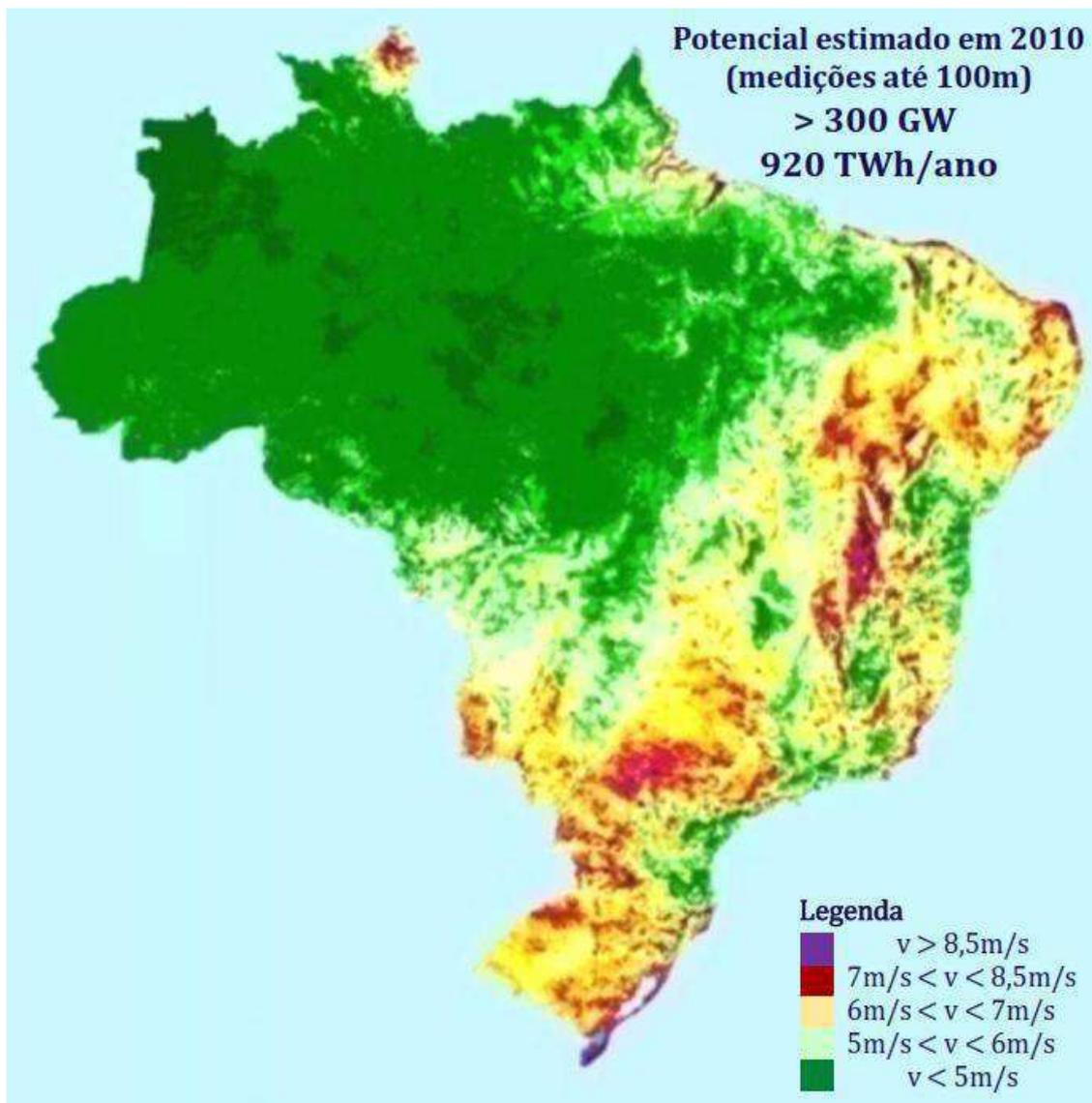
Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa real do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20 GW. Estimativas contidas no Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (AMARANTE 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.

Figura 15. Ilustração do potencial eólico em função da velocidade média dos ventos no Brasil  
(a) em 2001 pela ANEEL e (b) em 2010 pela EPE



(a)

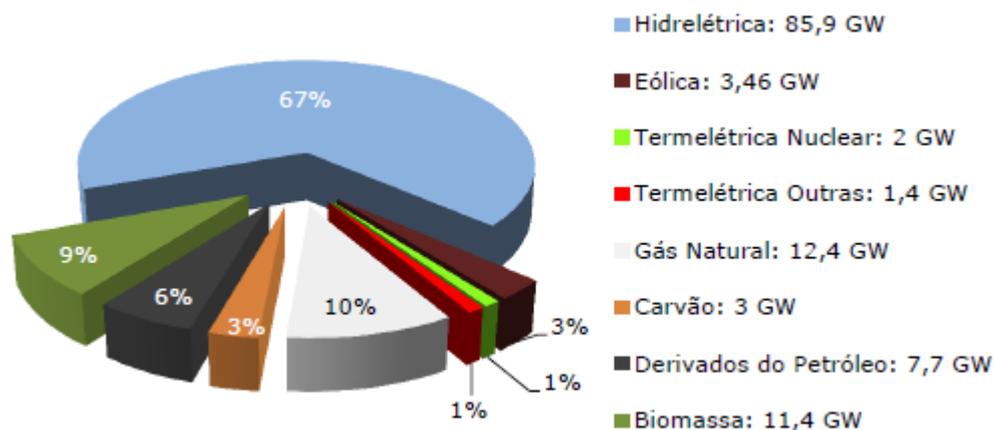


(b)

Fonte: 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 16. Gráfico da matriz elétrica brasileira, em janeiro de 2014



Fonte: 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).

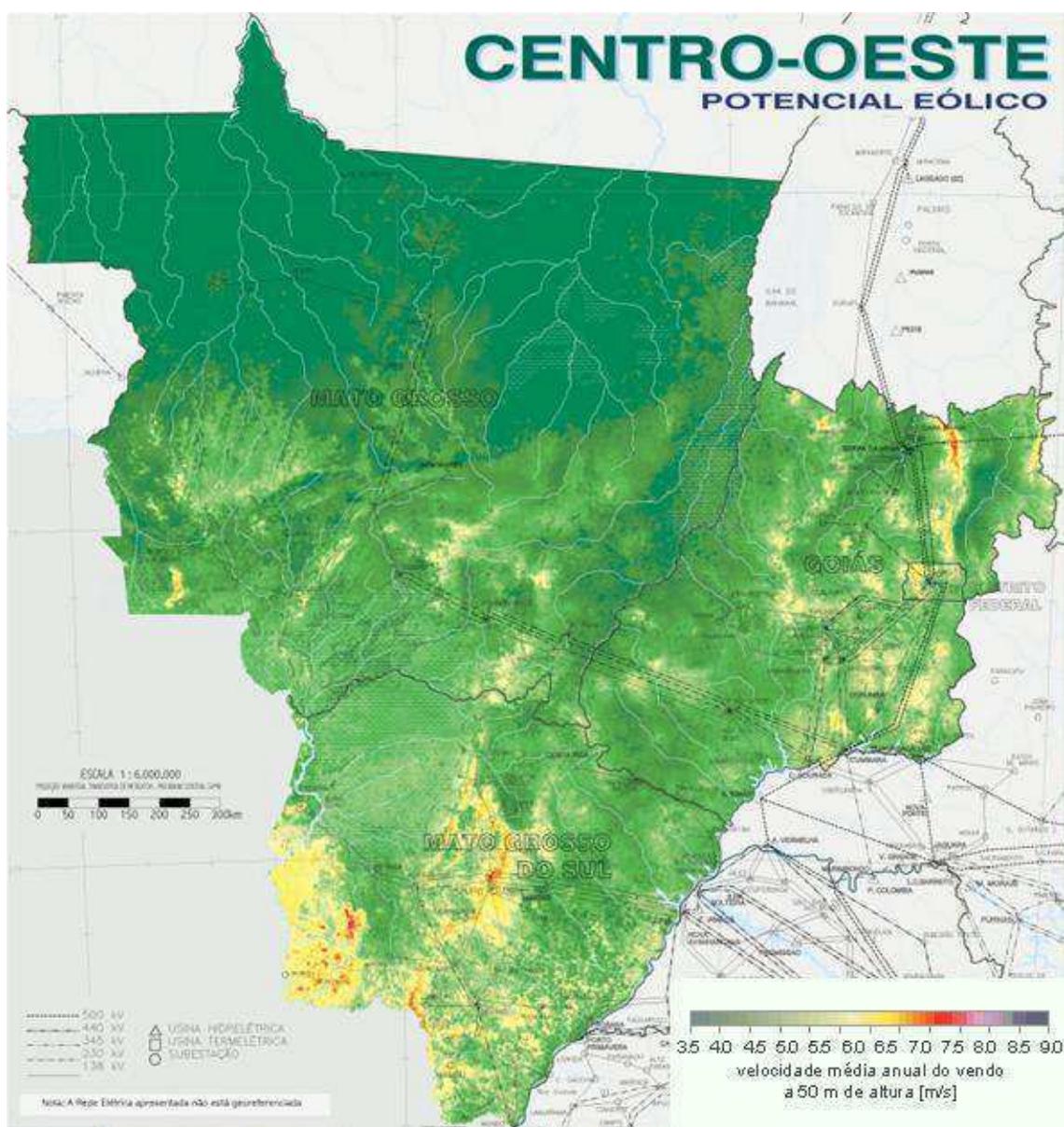
No entanto, segundo o último relatório da ABEEólica (2014) até o fim de 2013, 48 parques eólicos mantinham-se parados no país, o que representava uma perda de geração suficientemente capaz de abastecer 2 milhões de residências, pois o modelo de planejamento de transmissão era realizar o leilão de geração 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).

## 4.1 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 17.

Figura 17. Ilustração do potencial eólico brasileiro na Região Centro-Oeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

#### 4.1.1 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).

#### 4.1.2 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.

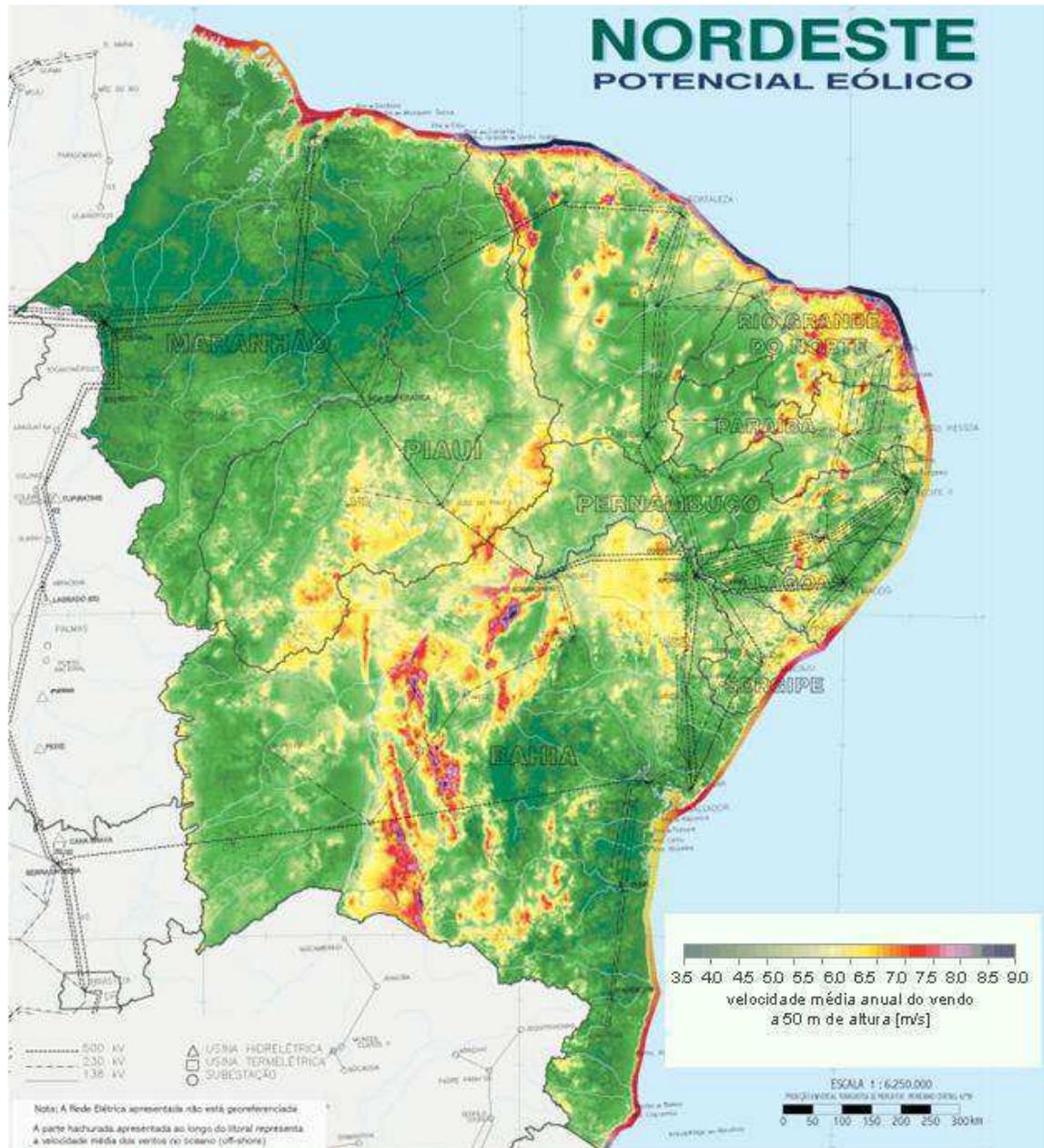
As velocidades médias anuais nessa área são maiores nas regiões mais elevadas, na fronteira do Mato Grosso do Sul com o Paraguai, devido, principalmente, ao efeito de compressão vertical do escoamento ao transpor as elevações.

## 4.2 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 Caetitê - 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 18.

FIGURA 18. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região nordeste, estimado em 2001, a 50m de altitude



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

#### 4.2.1 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 Infraestrutura (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 anemométricas 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.

#### 4.2.2 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 Luís, (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.

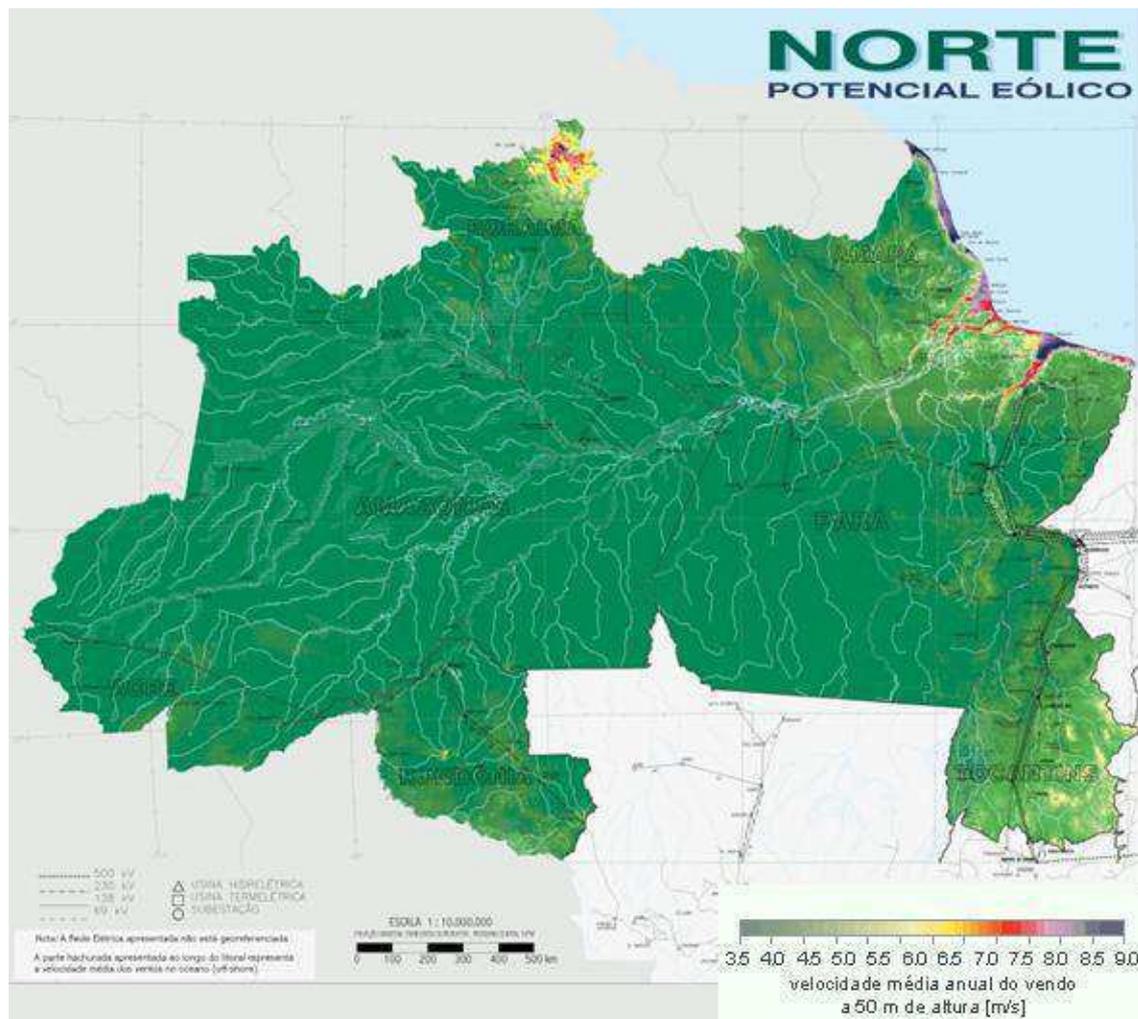
Entretanto, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

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.

### 4.3 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 19.

FIGURA 19. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região norte, estimado em 2001, a 50 m de altitude



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

#### 4.3.1 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 estar 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.

#### 4.3.2 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.

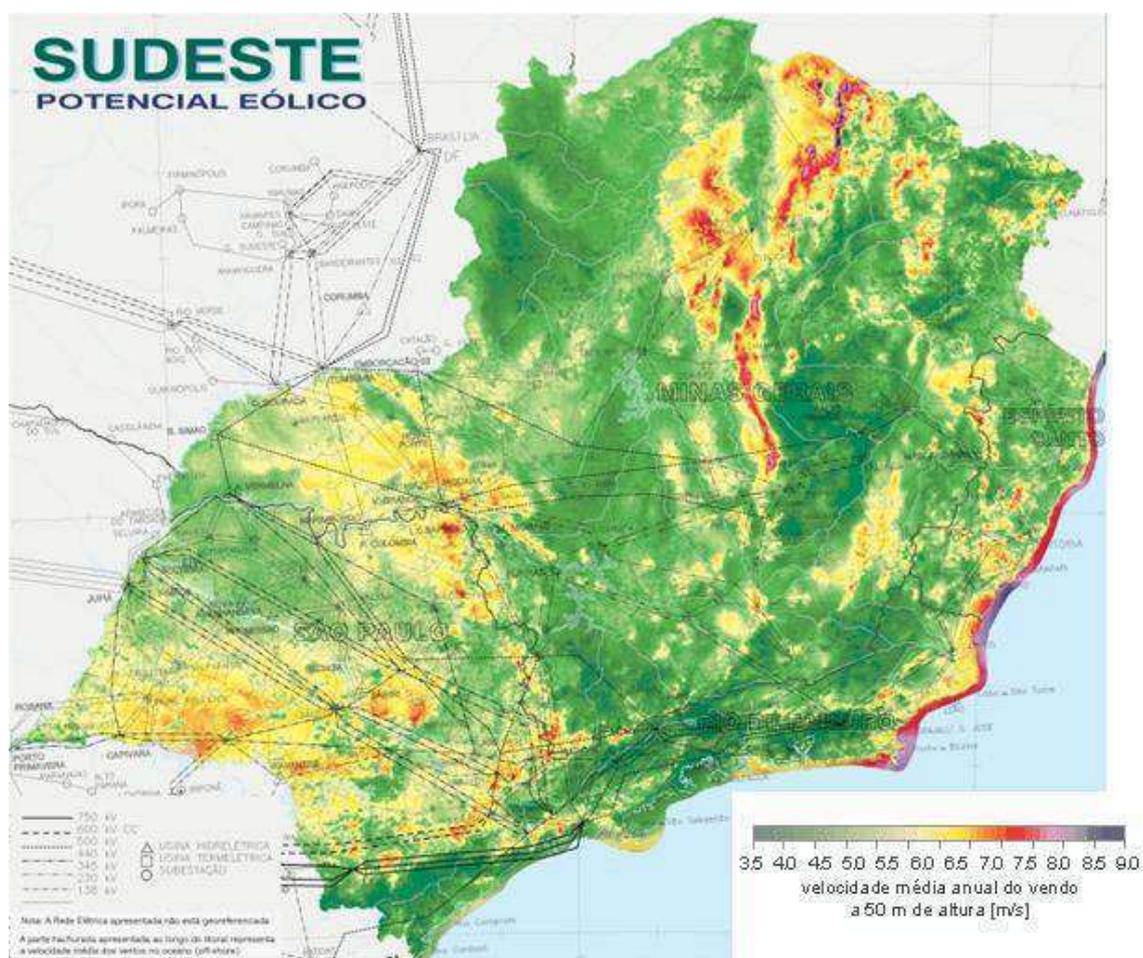
Na faixa de 100 km de largura, referente a Zona Litorânea Norte, o vento médio anual decresce rapidamente à medida que se desloca da costa para o interior, devido ao

aumento de atrito e rugosidade de superfície e ao enfraquecimento da contribuição das brisas marinhas.

#### 4.4 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 20.

FIGURA 20. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região sudeste, estimado em 2001, a 50 m de altitude



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

#### 4.4.1 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 Hidro meteorológico (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.

#### 4.4.2 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

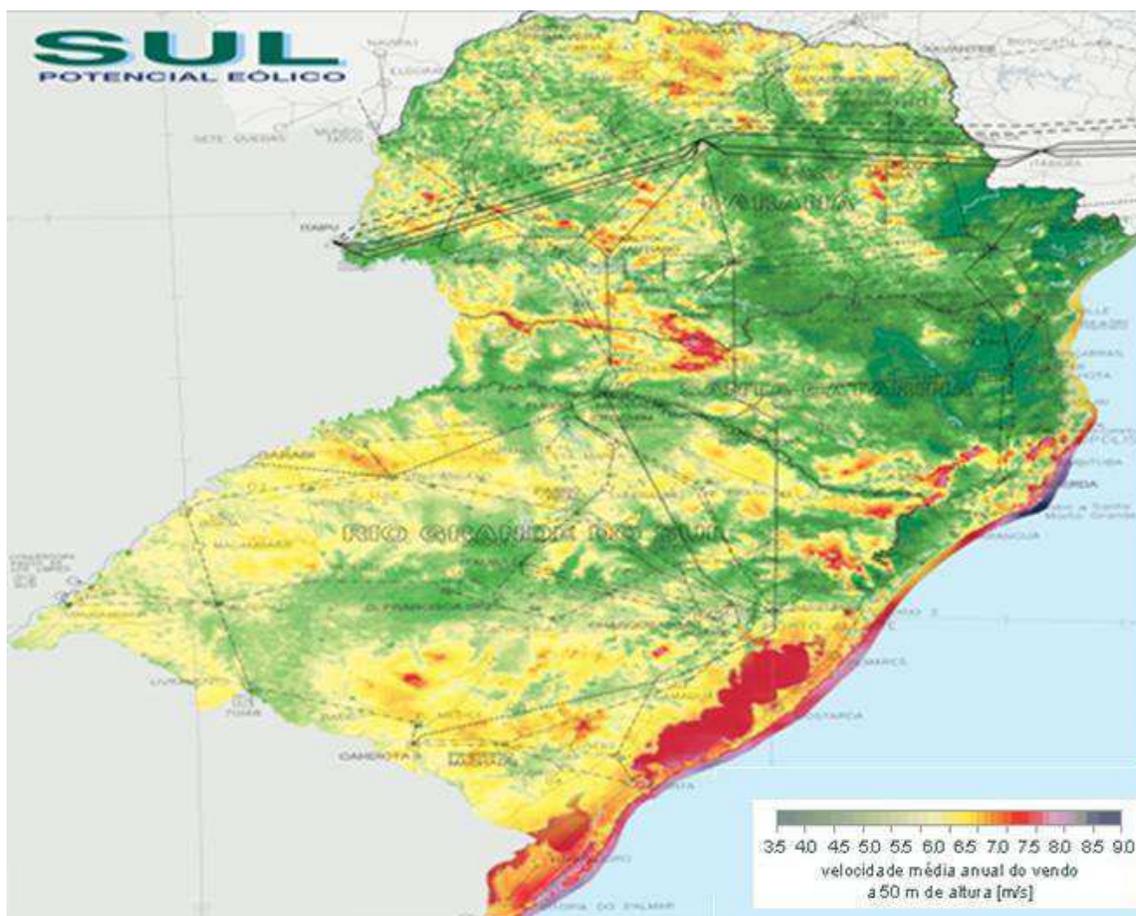
características locais com influência adicional, resultantes de uma combinação de fatores relacionados à topografia e ao terreno.

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.

#### 4.5 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 21.

FIGURA 21. Ilustração do potencial eólico brasileiro na região sul, estimado em 2001, a 50 m de altitude



Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

#### 4.5.1 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.

#### 4.5.2 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.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação mostrada neste estudo permite constatar a importância da utilização da energia eólica na geração de energia elétrica para o desenvolvimento sustentável e como ela está inserida no cenário mundial, bem como na matriz energética elétrica brasileira.

A energia eólica vem sofrendo um rápido crescimento em todo mundo. No Brasil, ela só começou a se expandir após uma política de incentivos através do PROINFA. Mas, a sua participação efetiva no setor elétrico brasileiro foi impulsionada, de verdade, quando passou a ser comercializada através dos leilões de energia que forma realizados. O sucesso da energia eólica nos últimos leilões vem mostrando a sua capacidade competitiva, tornando-se como uma das fontes alternativas de energia mais baratas no mercado brasileiro atualmente.

Se tem uma grande evolução da energia eólica, com potencial instalado até 2014 e o contratado para entrar em operação até 2016, por outro, pode ser considerada inexpressiva, quando comparada ao potencial eólico brasileiro. No entanto, essa relação não pode ser calculada com exatidão por causa da falta de dados atualizados sobre este potencial no Brasil. Este fato demonstra umas das deficiências do setor eólico brasileiro: a falta das pesquisas nacionais sobre o tema. O desenvolvimento de conhecimento e tecnologias brasileiras beneficiaria o setor de várias maneiras, como a adaptação dos equipamentos às características de funcionamento do sistema elétrico e dos recursos eólicos brasileiros, que resultaria num maior aproveitamento energético, e assim, numa redução de custos.

A falta de pesquisas e tecnologias nacionais não é, porém, o único desafio a ser superado pelo setor eólico brasileiro. Os principais problemas no curto prazo estão diretamente ligados com a expansão prevista do seu mercado, para o qual se deve aumentar o ritmo das instalações a fim de atender o cronograma de entregas. Para entender tamanha tarefa, considera-se os 1.325,6 MW de potência eólica instalados em 7 anos de PROINFA. Até 2016, o país deverá instalar cerca de cinco vezes essa capacidade. No entanto, o país precisa solucionar as exigências logísticas da cadeia de serviços e de fornecimento do setor, uma vez que tais problemas aumentam os custos dos projetos e assim inviabilizam os investimentos. Além disso, deve garantir uma alocação maior de

recursos financeiros para o financiamento dos empreendimentos, bem como aperfeiçoar os processos de concessão de crédito.

A definição de um calendário de leilões específicos para esta fonte energética, com o anúncio antecipado do volume de energia a ser contratado e uma regulação específica e apropriada, também seria muito bem recebido pelos investidores. Um plano de longo prazo governamental para a contratação de energia no país asseguraria os agentes investidores de que haveria demanda e os encorajaria no desenvolvimento de novos projetos. Ademais, criaria um ambiente ainda mais competitivo e propício para uma consolidação mais arrojada dessa fonte energética na matriz elétrica brasileira.

Embora o setor apresente alguns desafios setoriais, a situação da energia eólica no país é próspera. Como é possível observar, fatores externos e internos ao país resultaram neste cenário favorável. Sem dúvida, a crise econômica mundial, com a subsequente redução nos preços dos equipamentos, a evolução tecnológica, o desenvolvimento da indústria nacional e as ótimas condições ambientais foram os principais responsáveis. Aliados com as projeções mundiais de redução de custos e superação das adversidades internas, tais fatores proporcionarão uma trajetória ainda mais promissora para esta fonte de energia, corroborando assim, a concretização de sua expansão planejada para os próximos anos.

## BIBLIOGRAFIA

- 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: 01 Jun. 2015.
- 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: 01 Jun. 2015.
- 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 Maio 2015.
- 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 Jun. 2015.
- 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 Jun. 2015.
- 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 Jun. 2015.
- 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 Jun. 2015.
- 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 Jun. 2015.
- 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 Jul. 2015.
- 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 Jul. 2015.
- 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 Jul. 2015.

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: 11 Maio. 2015.

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: 07 Jun. 2015.

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: 15 Maio 2015.

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 Jun. 2015.

ELETRBRÁS; 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 Maio. 2015.

ELETRÔNICA. **Energia Eólica**. 2013. Disponível em: <<http://www.electronica-com.com/index.php/content/view/17/29/>>. Acesso em: 09 Jun. 2015.

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: 08 Jul. 2015.

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: 15 Maio 2015.

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 Maio 2015.

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: 01 Jun. 2015.

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: 02 Jul 2015.

MORAES, E. C. **Energia eólica no Brasil**. 2004. Disponível em: <<http://www.gabeira.com.br>>. Acesso em: 19 Jun. 2015.

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: 17 Maio 2015.

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 Jun. 2015.

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: 02 Maio 2015.

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 Jun. 2015.