

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CRISTHIANO VINICIUS SANTOS RIBEIRO

**ESTUDO PANORÂMICO DO USO DA ENERGIA EÓLICA NO
CONTEXTO ATUAL**

São Luís

2015

CRISTHIANO VINICIUS SANTOS RIBEIRO

**ESTUDO PANORÂMICO DO USO DA ENERGIA EÓLICA NO
CONTEXTO ATUAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

São Luís

2015

CRISTHIANO VINICIUS SANTOS RIBEIRO

**ESTUDO PANORÂMICO DO USO DA ENERGIA EÓLICA NO
CONTEXTO ATUAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para o grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira (Orientador)

Doutor em Engenharia Aeronáutica e Mecânica

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Me. Louryval Coelho Paixão (1º Examinador)

Mestre em Engenharia Mecânica

Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Me. Paulino Cutrim Martins (2º Examinador)

Mestre em Engenharia Mecânica

Universidade Estadual do Maranhão

RESUMO

A importância e o foco sobre questões relacionadas à produção de energia elétrica têm aumentado significativamente desde que os impactos que a mesma gera sobre o meio-ambiente começaram a ser levados em consideração, tanto no Brasil como no mundo. Tais questões começaram a ser tratadas com a finalidade de se encontrar uma solução que atendesse tanto a necessidade de produção de energia elétrica quanto a de preservação ambiental. Nesse contexto, as fontes renováveis de energia se apresentam como uma excelente alternativa para o problema mencionado, e, dentre elas, a energia eólica. Diversos estudos relativos às capacidades de vários lugares ao redor do planeta para a produção de energia elétrica a partir da eólica e também sobre as suas viabilidades técnicas e econômicas já foram realizados. De acordo com as pesquisas feitas, muitos países apresentam potenciais eólicos significativos, além de condições para a implantação de tal tecnologia. Assim, o presente trabalho pretende explicar, de forma clara e objetiva, uma visão panorâmica do uso da energia eólica no contexto atual, expondo o que já foi feito, o que tem sido feito e sua perspectiva de expansão, no mundo, no Brasil e no estado do Maranhão.

Palavras-chave: Fontes alternativas. Energia eólica. Potencial eólico.

ABSTRACT

The importance and focus on issues related to the production of electricity have increased significantly since the impact that it has on the environment began to be taken into consideration, both in Brazil and in the world. Such questions began to be treated in order to find a solution that would meet both the need for electric power production and the environmental preservation. In this context, renewable energy sources are presented as an excellent alternative to the problem mentioned, and, among them, the wind energy. Several studies on the capacities of various places around the world for the production of electricity from wind and also on their technical and economic viability have been performed. According to the research made, many countries have significant wind potential, and conditions for the deployment of such technology. Thus, this paper aims to explain, clearly and objectively, an overview of the use of wind energy in the current context, exposing what is already done, what has been done and its expansion prospects in the world, in Brazil and in the state of Maranhão.

Keywords: Alternative sources. Wind energy. Wind potential.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Parque eólico de *Vinderby*, na Dinamarca

Figura 2 - Práticas de atividades agropecuárias em parque eólico

Figura 3 - Evolução mundial da capacidade eólio-elétrica instalada, em GW

Figura 4 – Volume de controle para fluxo de ar através de um rotor de uma turbina eólica

Figura 5 - Esteira aerodinâmica e distância entre turbinas

Figura 6 - Usina eólio-elétrica de Prainha – Ceará

Figura 7 - Curva típica de potência em turbinas eólicas

Figura 8 - Exemplo de parque eólico terrestre

Figura 9 - Exemplo de parque eólico marítimo

Figura 10 - Esquema de turbina eólica

Figura 11 - Exemplo de torre tubular

Figura 12 - Exemplo de torre treliçada

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indústria de cataventos múltiplos nos EUA.

Tabela 2 - Valores relativos à capacidade eólico-elétrica do Brasil.

Tabela 3 - Resultados do cenário de Novas Políticas da AIE.

Tabela 4 - Continuação dos resultados do Cenário de Novas Políticas da AIE.

Tabela 5 - Resultados do Cenário Moderado da *GWEO*.

Tabela 6 - Continuação dos resultados do Cenário Moderado da *GWEO*.

Tabela 7 - Resultados do Cenário Avançado da *GWEO*.

Tabela 8 - Continuação dos resultados do Cenário Avançado da *GWEO*.

LISTA DE SIGLAS

AIE – Agência Internacional de Energia

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CHESF – Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica de Salvo Brito

DEBRA – Deutsche Brasileira

DLR – Deutsche Zentrum für Luft – und Raumfahrt

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

GWEO – Global Windy Energy Outlook

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

RIMA – Relatório de Impacto Ambiental

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

LISTA DE SÍMBOLOS

% - por cento

v - nu

\geq - maior ou igual

C – carbono

D – diâmetro

g – grama

h – hora

m – metro

N – nitrogênio

O – oxigênio

°C – grau celsiu

R\$ - reais

S – enxofre

s – segundo

ton. – tonelada

US\$ - dólar dos Estados Unidos

W – watt

η – eta

ρ – rho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Organização do trabalho	14
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	14
2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA	15
2.1 Conceito e importância	15
2.2 Origem	17
2.3 Histórico	17
2.4 Princípios e tecnologia	21
3 DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA EÓLICA NO MUNDO	27
3.1 Potencial eólico mundial	27
3.1.1 Principais países produtores de energia eólica	27
3.2 Estudos sobre o potencial eólico brasileiro	29
3.2.1 O potencial eólico brasileiro estimado	31
3.3 Energia eólica no estado do Maranhão	32
4 PARQUES EÓLICOS	35
4.1 Definição	35
4.2 Etapas da implantação de um parque eólico	36
4.2.1 Projeto	36
4.2.2 Instalação	37
4.2.3 Funcionamento	38
4.2.3.1 Componentes de uma turbina eólica	39
4.3 Principais parques eólicos mundiais	41
4.4 Principais parques eólicos no Brasil	44
5 PERSPECTIVA DO USO DA ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO ATUAL	47
5.1 No mundo	47
5.1.1 Cenário Novas Políticas da AIE	47
5.1.2 Cenário Moderado da <i>GWEO</i>	47
5.1.3 Cenário Avançado da <i>GWEO</i>	48
5.1.4 Resultado dos cenários	48
5.1.4.1 Resultados do Cenário de Novas Políticas da AIE	48
5.1.4.2 Resultados do Cenário Moderado da <i>GWEO</i>	49

5.1.4.3 Resultados do Cenário Avançado da <i>GWEO</i>	50
5.2 No Brasil	51
5.2.1 Oportunidades e desafios no caso brasileiro	53
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da humanidade, veio o desenvolvimento da tecnologia, juntamente com a utilização da energia elétrica. Tal utilização vem se intensificando constantemente para satisfazer tanto necessidades quanto o conforto da sociedade. Até então, as fontes para a produção de tal energia são principalmente oriundas de combustíveis fósseis (o que afeta seriamente o meio-ambiente natural, assim como o criado pelo homem), isto é, queima de carvão, o que gera elementos que poluem a atmosfera, a utilização de energia proveniente de usinas nucleares, o que produz efluentes radioativos, entre outras. Pode-se também citar as usinas hidrelétricas, porque, apesar de utilizar uma fonte renovável, sua construção normalmente implica em impacto ambiental (desmatamento, inundações). Além do fator do impacto ambiental, também se faz necessário levar em consideração os enormes custos inerentes à utilização dessas fontes de geração de energia, principalmente os do petróleo, do gás natural e do carvão mineral.

Apesar de todo o planeta sofrer as consequências do uso das fontes mencionadas anteriormente, elas não ocorrem de forma totalmente igual ou com os mesmos prejuízos dentre as regiões do globo/países. Dependendo de onde se esteja, se utiliza as fontes disponíveis (ou as que apresentarem mais vantagens na produção de energia), o que implica determinado impacto ambiental no local em questão (como por exemplo, em um local onde a maior tendência possa ser a utilização de carvão mineral, haverá como consequência a poluição atmosférica).

No Brasil, os principais meios para a produção de energia são as usinas hidrelétricas, em primeiro lugar, e as termelétricas em segundo, com potências fiscalizadas (isto é, as potências correspondentes àquelas consideradas a partir das operações comerciais realizadas pelas primeiras unidades geradoras) de, respectivamente, 85.854,188 e 39.343,977 kW (ANEEL, BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO, 2015). Com isso, as consequências que o país sofre são, principalmente, inundações nas áreas de construção das usinas hidrelétricas (quando necessário, o que por vezes implica também a retirada de moradores da área), e poluição da atmosfera devido aos resíduos tóxicos lançados na mesma pela operação das usinas termelétricas (havendo também uma consequência para o ser humano, que é o custo maior da energia utilizada, em comparação com a proveniente das hidrelétricas, em função do preço dos combustíveis fósseis). Apesar de a utilização de tais meios para produzir energia elétrica ser capaz de atender às necessidades, ela tem como consequência, em escala mundial, a poluição, pelo fato de usar

fontes não renováveis (exceção às usinas hidrelétricas, que como informado, causa impactos ambientais, mas não pelo seu modo de operação, e sim pela sua construção). Porém, com o desenvolvimento da humanidade mencionado, também surgiram o levantamento de questões relacionadas à preservação do meio-ambiente e uma maior consciência das pessoas em relação ao cuidado com o mesmo.

Tal consciência levou o ser humano, entre outras coisas, a entender que suas ações podem levar o planeta a uma situação crítica. A partir de então, começou-se a ver a natureza não apenas como uma fonte de recursos, mas também como uma parte fundamental da vida, que, como tal, deve ter sua existência valorizada e seu cuidado mantido.

Vários autores, em suas obras, ilustram a importância de ações que objetivam a manutenção de uma boa qualidade de vida. Segundo Bueno (1998, p. 31):

Se os Cidadãos, individualmente, forem confrontados com a necessidade da manutenção da biodiversidade para a manutenção da qualidade de vida de seus descendentes, sem pensar exclusivamente em seus benefícios de longo Prazo começarão a ser visualizadas, percebidos enfim, pelos humanos, e a conservação deixará de ser uma luta real de uma minoria e retórica da maioria para ser integrada às atividades sociais de todos como um fato normal e necessário à vida.

Contudo, demorou muito para que o homem desenvolvesse essa forma de pensamento e prestasse mais atenção ao grande mal que estava causando a ela devido à sua forma de agir, o que incrementou ainda mais os danos sofridos pela mesma, em escala mundial.

Frente a isso, alternativas devem ser procuradas para solucionar tais problemas, e uma das possíveis soluções é a utilização da energia eólica. Em vários países, assim como no Brasil, essa fonte de energia já está sendo utilizada como alternativa aos combustíveis fósseis, com destaque para Europa e para outros lugares na Ásia e na América (ENERGIA EÓLICA: POTENCIAL EÓLICO, 2012). Já no caso brasileiro, o nordeste é a região pioneira (ALVES, 2009), mas ainda não em seu aproveitamento total. As regiões com maior potencial eólico para produção de energia são, principalmente, o Nordeste e o Norte (que apresentam vantagens em relação ao investimento e à produção de energia), o Sul, e o Sudeste (ALVES, 2009). O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro aponta que o país tem capacidade para a produção de aproximadamente 143.000 MW. Destes, 7.694,05 MW já tem autorização. Porém, as unidades em operação para produzir geram apenas 26,8 MW (sendo que o estado do Ceará participa com 65% dessa capacidade). Considerando todos esses fatores, o objetivo deste trabalho é estudar o

uso da energia eólica no contexto atual de forma ampla, e apontar possíveis soluções e/ou melhoras no quadro atual, devido às necessidades e às vantagens de utilização de tal meio.

1.1 Organização do trabalho

A forma de abordagem do presente trabalho será a indutiva. O leitor será apresentado a conceitos e dados relativos aos fundamentos da energia eólica, a sua disponibilidade no mundo, aos parques eólicos e à perspectiva de seu uso no contexto atual. Feito isso é apresentada uma discussão, considerando-se todos os fatores anteriormente mencionados, seguido de uma conclusão na qual sugestões relativas ao presente e ao futuro são apresentadas, tendo como base todo trabalho realizado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Apresentar uma visão panorâmica do contexto atual da produção energética no mundo, mostrando a importância e desafios do aumento da implantação de sítios eólicos na produção de energia elétrica, avaliando a valorização dos governos ao assunto em questão, frente a necessidade do aumento do uso de fontes alternativas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar um estudo sobre energia eólica mostrando sua disponibilidade e sua importância;
- Discorrer sobre os principais sítios eólicos mundiais e brasileiros;
- Fazer uma estimativa da quantidade de energia que pode ser gerada e a capacidade de abastecimento energético desse montante;
- Discutir a questão energética, tendo em vista uma perspectiva da geração de energia no futuro;
- Apresentar as perspectivas de viabilidade econômica de utilização da energia eólica no MA.

2 FUNDAMENTOS DA ENERGIA EÓLICA

2.1 Conceito e importância

Energia eólica é o processo de transformação da energia oriunda dos ventos em energia útil (ANEEL, 2001), como por exemplo, na utilização de aerogeradores para obtenção de eletricidade, moinhos de vento para produção de energia mecânica ou velas para o impulso de barcos veleiros.

Ela é uma fonte de energia renovável e continuamente disponível, em relação aos combustíveis fósseis, constituindo uma alternativa limpa à produção de energia, não gerando gases do efeito estufa, podendo ser produzida em praticamente qualquer lugar que apresente viabilidade, além de requerer menos terreno para sua implantação. Devido à tais fatores, o impacto ambiental gerado é bem menor, se comparado com outras fontes de energia elétrica. A Figura 1 mostra um parque eólico em um rio, ressaltando assim, a relativa facilidade de instalação deste tipo de energia.

Figura 1 - Parque eólico de *Vinderby*, na Dinamarca



Fonte: Castro (2005)

Sua importância se dá, principalmente, devido dois fatores: o de ser uma fonte limpa e renovável e o de poder contribuir para a produção de energia elétrica, podendo substituir (ao menos em parte) fontes poluidoras não renováveis tradicionais.

A energia eólica é uma fonte alternativa que não utiliza água como elemento motriz e nem como fluido refrigerante, não produz resíduos radioativos ou gasosos, que poderiam prejudicar a atmosfera. Além disso, pelas suas características, sua área de

instalação pode ser também aproveitada para outras atividades, como pastagens e outras relativas à agropecuária, como no exemplo exposto na Figura 2, a seguir.

Figura 2 - Práticas de atividades agropecuárias em parque eólico



Fonte: NREL (2001)

Um grande benefício que ela pode oferecer em relação ao meio-ambiente é a não emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, pois esse gás é o maior responsável pela intensificação do efeito estufa. Devido a sua moderna tecnologia, a energia eólica apresenta um equilíbrio energético em relação ao CO_2 , pois todas as emissões desse gás, relativas à fabricação, instalação e serviços ao longo de todo o ciclo de vida de um aerogerador são compensadas depois de um período de três a seis meses após sua fabricação (PORTAL ENERGIA: ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2015). Além desse benefício, ela ainda apresenta os seguintes (PORTAL ENERGIA: ENERGIAS RENOVÁVEIS, 2015):

- Sendo o vento um recurso abundante e renovável, a dependência de combustíveis fósseis é reduzida;
- Causa melhorias na economia local e oferta empregos. Estudos realizados na Escócia estimam que de 0,3 a 1 GW de potência, entre 500 a 1500 oportunidades de emprego estão associadas;
- Apresenta uma emissão de poluentes mínima, de forma que não é responsável por mudanças climáticas, chuvas ácidas, etc.;

- É um setor da indústria em fase de crescimento, com boas perspectivas no mundo e no Brasil, principalmente no Nordeste deste;
- Podendo ser conectada à rede elétrica, contribui para o suprimento de energia;
- A tecnologia está totalmente dominada, porém ainda em grande desenvolvimento, o que proporciona uma constante redução de custos relacionados à construção e à geração.

2.2 Origem

O vento, isto é, a atmosfera em movimento, tem sua origem na associação entre a energia solar e a rotação do planeta. Todos os planetas, em nosso sistema solar, que são envoltos por gases, apresentam ventos em sua superfície, demonstrando a existência diversas formas de circulação atmosférica. Trata-se de um mecanismo solar-planetário permanente; sua duração é mensurável na escala de bilhões de anos. O vento é considerado uma fonte renovável de energia (CRESESB, 2001).

2.3 Histórico

As Primeiras formas de utilização da força dos ventos pelo ser humano não tem uma data muito exata, mas, certamente aconteceram há milhares de anos, no Oriente. Provavelmente, eram máquinas que possuíam placas ou velas e, a partir do aproveitamento aerodinâmico produziam trabalho (CRESESB, 2001).

Ainda de acordo com o CRESESB (2001), estima-se que a partir da Idade Média, o ser humano começou a utilizar as forças de sustentação aerodinâmicas com maior frequência, abrindo caminho às possibilidades das grandes navegações e ao aumento da eficiência das máquinas que aproveitavam as forças do vento. Tais máquinas eólicas foram, provavelmente, introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI. No século XIV, na Holanda, esses dispositivos já demonstravam uma grande evolução tecnológica, capacidade em potência, e uma vasta gama de aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e em bombeamento de água. Em 1500, na época do descobrimento do Brasil, já existiam milhares de moinhos de vento no continente europeu, da Península Ibérica até os países nórdicos. No decorrer dos séculos seguintes, aumentaram-se as utilizações das máquinas eólicas em tal continente, como em fabricação de papel, para atender à demanda após o surgimento da imprensa, em produção de óleos vegetais e até em

projetos de drenagem de grande porte. Porém os moinhos de vento começaram a ficar em desuso, devido à expansão da utilização de máquinas à vapor, no século XIX (CRESESB, 2001).

No mesmo século, nos Estados Unidos, ocorreu outro período de expansão da utilização das máquinas eólicas. A disseminação da utilização de cataventos multipás para bombeamento de água teve início após a abolição da escravidão naquele país, em 1863. Tais cataventos foram produzidos industrialmente por diversos fabricantes, atingindo escalas de milhares de unidades por ano, o que tornou possível preços acessíveis a grande parte da população (CRESESB, 2001). Tais fatos contribuíram de forma significativa para a economia americana. Porém, muitos historiadores alocam parcela dessa contribuição, juntamente com a rapidez em que se deu a expansão para o Oeste, à disponibilidade de cataventos multipás de baixo custo, pois estes facilitaram a fixação e o acesso água em grande áreas áridas ou semiáridas (CRESESB, 2001).

A Tabela 1, abaixo, apresenta a transcrição do *U.S Statistical Abstract*, de 1919 (de Torrey, feito em 1976), que mostra o desenvolvimento da indústria de cataventos multipás nos Estados Unidos, entre 1879 e 1919. Estima-se que mais de 6 milhões de cataventos multipás foram produzidos no mundo.

Tabela 1 - Indústria de cataventos multipás nos EUA.

ANO	EMPREGADOS	FATURAMENTO (US\$)
1879	596	1.011.000
1889	1110	2.475.000
1899	2045	4.354.000
1909	2337	6.677.000
1919	1932	9.933.000

Fonte: Adaptado de CRESESB (2001)

A utilização de cataventos multipás nos Estados Unidos espalhou-se por diversos países, inclusive pelo Brasil. Nos anos 1880, já se encontravam uma dezena de fabricantes de tais dispositivos, em todo o país (CRESESB, 2001).

Ainda nos Estados Unidos, na década de 1930, para a geração de energia elétrica, teve início uma maior utilização de pequenos aerogeradores com a finalidade de carregar baterias, favorecendo o acesso à eletricidade aos moradores do meio rural.

No período entre essa década e a de 1960, milhares desses aerogeradores foram fabricados e implantados no país, e também exportados para diversos outros (CRESESB, 2001). À medida que as redes de eletrificação foram dominando o atendimento rural, gradualmente a produção de tais máquinas foi sendo desativada, entre as décadas de 1950 e 1960 (CRESESB, 2001).

A utilização de turbinas eólicas de grande porte, para uma produção de energia elétrica em grande escala, que seja suficiente para complementar o sistema elétrico, é uma tecnologia que existe há diversas décadas. Entre 1940 e 1950, durante a fase experimental, destacam-se os primeiros aproveitamentos eólico-elétricos nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e na Dinamarca (Gedser) (CRESESB, 2001). Porém, o mais provável precursor das turbinas eólicas contemporâneas surgiu na Alemanha, em 1955 (Hütter), com as pás já fabricadas com materiais compostos e com controle de passo, além de torres tubulares esbeltas (CRESESB, 2001).

Após a ocorrência de primeira grande crise de preços do petróleo, diversos países, desde a década de 1970 até metade da década de 1980, inclusive o Brasil, começaram a direcionar recursos para pesquisas relativas à utilização de energia eólica para a produção de energia elétrica (CRESESB, 2001). Foi nesse período que houve o desenvolvimento da turbina DEBRA (Deutsche Brasileira), feito por uma parceria entre os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil e da Alemanha (CRESESB, 2001).

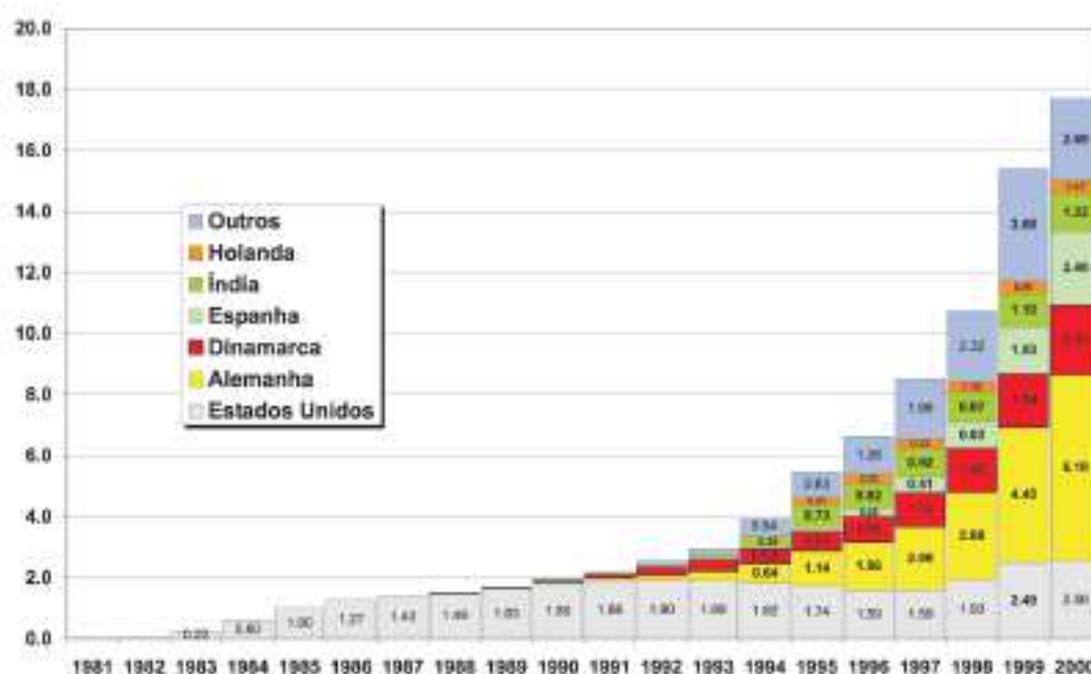
Contudo, o aproveitamento eólico-elétrico só alcançou uma escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico (em termos de geração e economicidade) a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990) (CRESESB, 2001). A evolução da tecnologia passou a ser conduzida pelas indústrias que recentemente haviam surgido no setor, sob o regime de competição, impulsionadas por mercados institucionais de incentivo (principalmente através da remuneração pela energia produzida). Também marcaram esse processo as seguintes características (CRESESB, 2001):

- O investimento em energia elétrica passou a ser acessível a uma nova e diversa gama de investidores, devido à modularidade;
- Por causa da produção em escalas industriais crescentes, do aumento da capacidade unitária das turbinas e de novas técnicas construtivas, foi

possível reduzir gradualmente e significativamente os custos por quilowatt instalado e, conseqüentemente, os custos de geração.

Ainda de acordo com o CRESESB (2001), o principal problema inicial, que eram os acidentes das turbinas com pássaros, praticamente desapareceu, a partir da utilização de turbinas de grande porte e menores velocidades angulares dos rotores. Pelo fato de se mostrar uma alternativa de geração que possui impactos ambientais quase nulos, sua instalação tornou possível a simplificação dos minuciosos e demorados estudos do meio-ambiente exigidos pelas entidades tradicionais de energia elétrica, sendo suficiente, em muitos casos, os poderes concedentes delimitarem as áreas autorizadas para a implantação (CRESESB, 2001). Devido a esse fato e ao da produção de turbinas em escalas industriais, a tecnologia da geração eólico-elétrica tornou-se uma das de maior crescimento em relação à expansão de capacidade geradora. A Figura 3 demonstra a evolução cumulativa da capacidade eólico-elétrica instalada no mundo, até 31/12/2000:

Figura 3 - Evolução mundial da capacidade eólico-elétrica instalada, em GW



Fonte: Rehfeldt e Christian (2001)

Da figura, tirando como exemplo a Alemanha, país densamente povoado, foram introduzidos a mais 1.665 MW eólico-elétricos no ano de 2000, chegando a um total de 6.094,8 MW instalados naquele país, até 31/12/2000 (REHFELDT e

CHRISTIAN, 2001). No mesmo ano, foi destacável o aumento da capacidade eólica da Espanha, Índia e China.

2.4 Princípios e tecnologia

O princípio de funcionamento de uma turbina eólica é a captação de parte da energia cinética do vento que passa através da área coberta pelo rotor, e a transforma em energia elétrica. A potência dessa energia transformada é dada pela Equação 1 a seguir (CRESESB, 2001):

$$P \text{ (Watts)} = \frac{1}{2} (\rho \times A_R \times v^3 \times C_P \times \eta) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

ρ é a densidade do ar;

A_R é a área coberta pelo rotor;

v é a velocidade do vento;

C_P é o coeficiente aerodinâmico de potência do rotor;

η é a eficiência do conjunto gerador/transmissão.

Essa equação (para turbinas eólicas horizontais) tem origem nos seguintes princípios e equações (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

- A energia contida no vento horizontal é basicamente sua energia cinética, uma vez que não há variação de pressão e de altitude, de acordo com a seguinte expressão (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

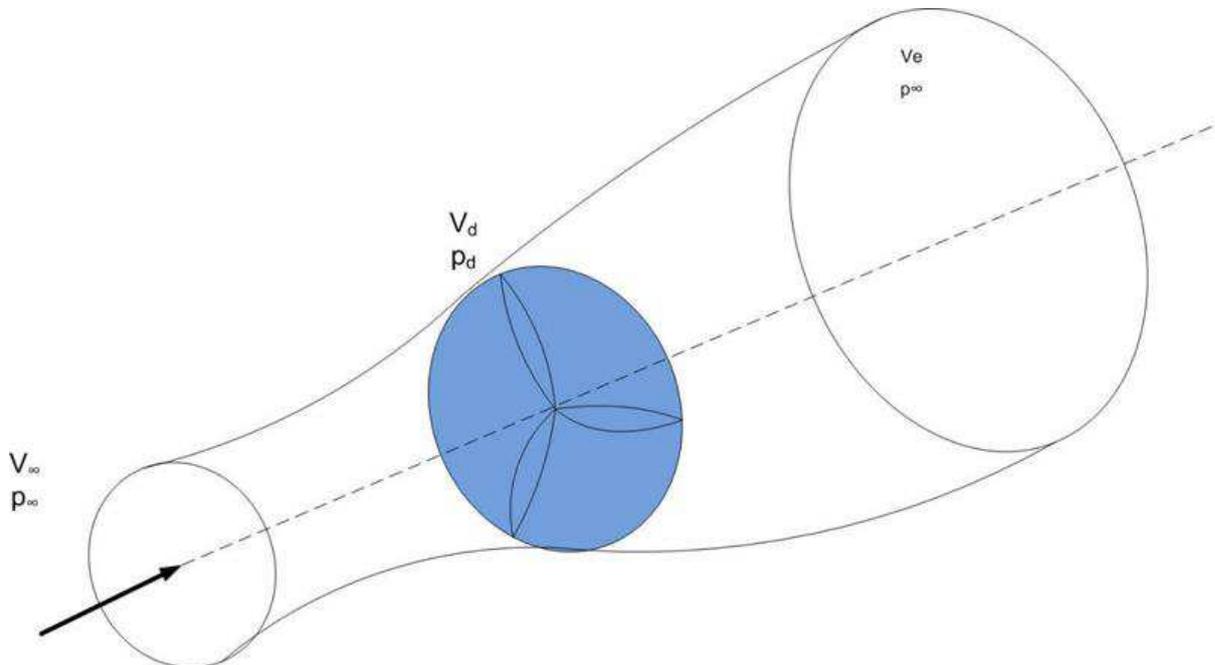
E é a energia cinética contida no vento;

m é a massa de ar;

v é a velocidade do vento.

- Para a aplicação da equação da energia cinética anteriormente mostrada, se considera a massa de ar e a velocidade contidas no volume de controle mostrado a seguir na figura 4 (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

Figura 4 – Volume de controle para fluxo de ar através de um rotor de uma turbina eólica



Fonte: Turbinas Eólicas: Introdução [21-?]

Na qual V_∞ é a velocidade do vento muito antes de sofrer influência do rotor;

p_∞ é a pressão do ar sem sofrer influência do rotor;

V_e é a velocidade do vento na esteira do rotor (que será explicada posteriormente).

Assim, aplica-se a conservação de massa ao duto imaginário mostrado na figura 4 (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$\rho \times A_\infty \times V_\infty = \rho \times A_d \times V_d = \rho \times A_e \times V_e \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

ρ é a densidade do ar;

A é área coberta pelo rotor;

V é a velocidade do vento.

- A velocidade no disco da turbina está relacionada com a velocidade do vento a montante através do fator de indução de fluxo axial “a”, da seguinte maneira (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$V_d = V_\infty \times (1 - a) \quad \text{Equação (4)}$$

Aplicando a equação (4) na equação (3), tem-se (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$A_d = \frac{A_\infty}{(1-a)} \quad \text{Equação (5)}$$

- Devido à conservação da massa, a redução da velocidade do vento ao passar pelo rotor aumenta a área do tubo imaginário, proporcionalmente ao fator de redução da velocidade. Essa redução representa uma variação de momento no fluxo de ar, que é causada pela força exercida pela variação de pressão no rotor da turbina, o que pode ser expresso da seguinte forma (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$(V_\infty - V_e) \times \rho \times A_d \times V_\infty \times (1 - a) = (p_d^+ - p_d^-) \times A_d \quad \text{Equação (6)}$$

- Aplicando a equação de Bernoulli às duas seções imaginárias do tubo, tem-se (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$\frac{1}{2} \times \rho_\infty \times V_\infty^2 + \rho_\infty \times g \times h_\infty = \frac{1}{2} \times \rho_d \times V_d^2 + \rho_d \times g \times h_d + P_d^+ \quad \text{Equação (7)}$$

Considerando o fluido incompressível e o sistema horizontal, tem-se (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$\frac{1}{2} \times \rho \times V_\infty^2 + \rho_\infty = \frac{1}{2} \times \rho \times V_d^2 + P_d \quad \text{Equação (8)}$$

$$\frac{1}{2} \times \rho \times V_e^2 + \rho_\infty = \frac{1}{2} \times \rho \times V_d^2 + P_d^- \quad \text{Equação (9)}$$

Subtraindo-se as equações (8) e (9), tem-se (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$(p_d^+ - p_d^-) = \frac{1}{2} \times \rho \times (V_\infty^2 - V_e^2) \quad \text{Equação (10)}$$

Substituindo-se a equação (10) na equação (6), tem-se (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

$$V_e = (p_d^+ - p_d^-) \times A_d = 2 \times \rho \times A_d \times V_\infty^2 \times a \times (1 - a) \quad \text{Equação (11)}$$

Conseqüentemente, a potência será dada por (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]):

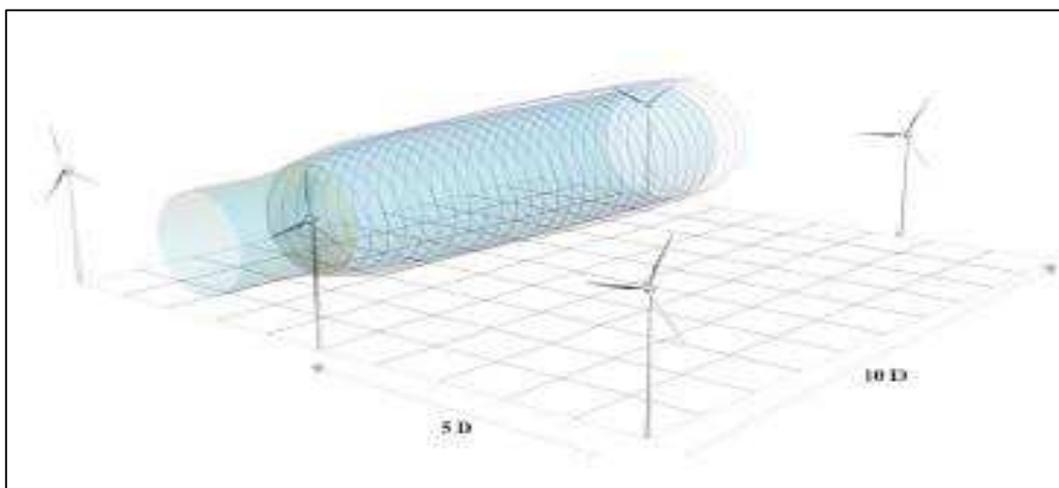
$$P = F \times V_d = 2 \times \rho \times A_d \times V_\infty^3 \times a \times (1 - a) \quad \text{Equação (12)}$$

Que por sua vez pode ser escrita na forma da equação (1) (TURBINAS EÓLICAS: INTRODUÇÃO, [21-?]).

Devido à absorção de energia cinética, a velocidade do vento a jusante do disco do rotor é reduzida, mas recupera-se ao se misturar com as massas de ar predominantes do escoamento livre. Uma esteira helicoidal de vórtices é formada, como resultado das forças de sustentação aerodinâmica nas pás do rotor, que posteriormente também se dissipa, gradualmente. Depois de alcançar distância da turbina, a velocidade do vento praticamente recupera suas condições iniciais, propiciando assim a instalação de turbinas adicionais, reduzindo as perdas de desempenho inerentes a uma turbina anterior (CRESESB, 2001).

Ainda de acordo com o CRESESB (2001), na prática, essa distância é função da velocidade do vento, das condições de operação da turbina, da rugosidade do terreno e da condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera local. De modo geral, uma distância considerada segura é da escala de dez vezes o diâmetro do rotor, se instalada a jusante, e cinco vezes o mesmo diâmetro se instalada ao lado, em relação à direção do vento predominante, como ilustrado a seguir na Figura 4.

Figura 5 - Esteira aerodinâmica e distância entre turbinas



Fonte: CRESESB (2001)

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro D do mesmo. No projeto, normalmente, a rotação é otimizada para minimizar os ruídos aerodinâmicos gerados pelas pás. Para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica, tem-se a Equação 2 abaixo (CRESESB, 2001):

$$\text{rpm} = 1150D^{-1}$$

Equação (13)

Na proporção em que o desenvolvimento tecnológico propicia turbinas de maiores portes, a rotação se reduz. Os diâmetros de rotores no mercado atual variam entre 40 e 80 metros, resultando em rotações da ordem de 30 a 15 rotações por minuto, respectivamente (CRESESB, 2001). Uma vantagem de baixas velocidades de rotação é que assim as pás se tornam visíveis e evitáveis aos pássaros em voo. Em relação aos níveis de ruídos produzidos, as turbinas eólicas cumprem os requisitos de meio-ambiente se instaladas a no mínimo 300 m de distância das áreas residenciais (CRESESB, 2001) - um exemplo é mostrado a seguir na Figura 5. Tais fatores contribuem para que a tecnologia eólio-elétrica tenha um impacto ambiental muito baixo, dentre as fontes de produção de energia elétrica.

Figura 6 - Usina eólio-elétrica de Prainha – Ceará



Fonte: CRESESB (2001)

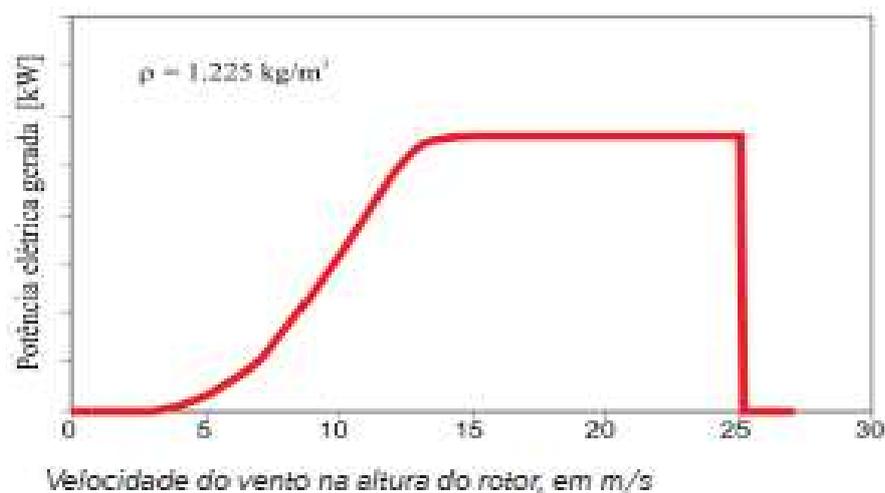
Uma usina eólica é um conjunto de turbinas eólicas dispostas adequadamente em uma mesma área. A proximidade geográfica possui as seguintes vantagens econômicas da diluição de custos (CRESESB, 2001):

- Arrendamento de área;
- Fundações;
- Aluguel de guindastes e montagem;
- Equipes de operação;
- Manutenção e estoques de reposição.

Usinas eólicas com turbinas de projeto consolidadas e equipes de manutenção corretamente treinadas e capacitadas apresentam uma disponibilidade da ordem de 0,98 (CRESESB, 2001).

A Figura 6 a seguir apresenta uma típica forma de curva de potência de turbinas eólicas:

Figura 7 - Curva típica de potência em turbinas eólicas



Fonte: CRESESB (2001)

As curvas de potência fornecidas pelos fabricantes normalmente são medidas por instituições credenciadas e independentes, e comumente se referem a velocidades de vento aproximadamente instantâneas, com médias de dez minutos, densidade de $1,225 \text{ kg/m}^3$, $15 \text{ }^\circ\text{C}$, e ao nível do mar, sendo que no caso das temperaturas de grande parte do território brasileiro, são necessárias correções para a densidade do ar local (CRESESB, 2001).

Normalmente, a geração elétrica se inicia com velocidades de vento da ordem de 2,5 a 3 metros por segundo, sendo que abaixo de tais valores, seu conteúdo energético não justifica sua utilização, ao passo que velocidades acima de aproximadamente 12 a 15 metros por segundo ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, porque ventos muito fortes ($v > 25 \text{ m/s}$ no exemplo) produzem turbulências que podem prejudicar a estrutura das mesmas, caso em que a rotação das pás é reduzida e o sistema elétrico do gerador é desconectado da rede elétrica (CRESESB, 2001).

3 DISPONIBILIDADE ENERGÉTICA EÓLICA NO MUNDO

3.1 Potencial eólico mundial

Em se tratando de escala mundial, a energia eólica é bem melhor utilizada em outros lugares do que no Brasil. Os dez países pioneiros no aproveitamento da energia eólica são (ENERGIA EÓLICA: POTENCIAL EÓLICO, 2012): Estados Unidos, China, Alemanha, Espanha, Índia, Itália, França, Reino Unido, Portugal e Dinamarca.

Em 2005, a capacidade de produção de energia elétrica a partir da eólica era de 59 GW, suficiente para abastecer satisfatoriamente um país como o Brasil (EXPLICATORIUM – ENERGIA EÓLICA, 2015), por exemplo. Uma boa referência da utilização em larga escala da energia eólica é o estado da Califórnia, nos Estados Unidos. Além de não gerar impactos ambientais significantes, gera uma economia de dez milhões de barris de petróleo (ENERGIA EÓLICA: POTENCIAL EÓLICO, 2012).

3.1.1 Principais países produtores de energia eólica

Os dez principais países produtores de energia eólica são (ENERGIA EÓLICA: POTENCIAL EÓLICO, 2012):

- **Estados Unidos:** o país tem uma capacidade produzir 35.000 megawatts, o que lhe concede o título de líder em produção na área no mundo. Os parques eólicos americanos geram, aproximadamente, 2% da energia produzida no país. O estado do Texas possui a maior capacidade de energia eólica. O Parque Eólico de Roscoe é o maior parque *onshore* do mundo. Ao total 9.900 megawatts de potência foram gerados a mais em energia eólica em 2009, o suficiente para abastecer 2,4 milhões de residências, e equivalente a 3 usinas nucleares.
- **China:** atingindo 25.100 megawatts em 2009, a energia eólica se transformou em um dos componentes-chaves para o crescimento da economia do país. A grande quantidade de terras e o vasto litoral fazem da China um país promissor na área de produção de energia elétrica a partir da energia dos ventos. O Conselho Global de Energia Eólica acredita que a escala e o ritmo do desenvolvimento da energia eólica na China não podem ser comparados com os

de qualquer outro país no mundo. Existem 8 estações eólicas no país. A primeira turbina de vento permanente de levitação magnética, que permite a produção de eletricidade mesmo com ventos a baixas velocidades, foi apresentada por inventores chineses na Exposição de Energias Eólicas da Ásia, em 2006.

- **Alemanha:** o país chegou a produzir aproximadamente 26.000 megawatts de energia eólica no início da década. Essa fonte alternativa representa algo em torno de 7% de toda a produção do país de eletricidade. Em 2006, a única e a mais alta turbina eólica do mundo, a *Fuhrländer* (turbina eólica Laasow), foi construída em Brandebourg. Ela possui aproximadamente 160 metros de altura. Em abril de 2010, a Alemanha abriu seu primeiro parque de energia eólica *offshore* (próximo à costa). Embora seja um país líder no cenário mundial, a estratégia de energia eólica alemã é constantemente debatida entre os críticos, que afirmam que isso é caro e instável, por causa dos padrões irregulares de vento do país.
- **Espanha:** com uma capacidade total instalada de 19.740 megawatts, a Espanha é a quarta no índice dos melhores produtores na área de energia eólica no mundo. Em 2009 a eletricidade produzida pela energia eólica ultrapassou o carvão como fonte principal, com uma contribuição de 14% da demanda de eletricidade do país.
- **Índia:** o desenvolvimento da energia eólica na Índia começou nos anos 90. O subcontinente é relativamente recém chegado à indústria, mas já se tornou o quinto maior produtor de energia eólica do mundo. Em 2009, a Índia produziu 10.925 megawatts de energia eólica. Tal energia representa 1,6% da eletricidade produzida no país. O desempenho crescente das turbinas transformou a energia eólica na opção favorita para incrementar a matriz energética na Índia. A Associação Indiana de Energia Eólica estima que a capacidade de geração de eletricidade da Índia possa atingir até 65.000 megawatts.
- **Itália:** em 1999, o governo italiano possuía o plano de instalação de 2.500 megawatts de capacidade eólica em 2010. O país ultrapassou esse objetivo em 2007, e em 2009 já tinha uma produção de 4.850 megawatts.
- **França:** apesar do potencial crescente de energia eólica, e de uma capacidade de 4.492 megawatts (em 2009), a França enfrenta diversos problemas em relação a instalação dessa fonte em seu território, devido, principalmente à conexões de

rede inadequadas e áreas de proteção, nas quais a implantação de turbinas eólicas é proibida. A associação francesa de energia *Syndicat des Energies Renouvelables* estima que o país possa atender até 20% de sua demanda de energia a partir de fontes renováveis. O país tem o potencial para construir 12 vezes sua capacidade atual de energia eólica. Porém, enfrenta obstáculos, sendo o maior deles os altos custos.

- **Reino Unido:** em janeiro de 2012, a capacidade de energia eólica instalada no Reino Unido ultrapassou 4.000 megawatts. Depois da biomassa, o vento é a segunda maior fonte de energia renovável no país. Este possui tanto estações eólicas terrestres quanto marítimas. Com sua terceira fase de instalações de usinas eólicas *offshore*, o Reino Unido estima um aumento de sua potência para 29.000 megawatts, até 2020.
- **Portugal:** o país fica em segundo lugar em relação à Dinamarca apenas em termos de contribuição com energia do país vinda de fontes eólicas. Possui um plano para um grande incremento em sua capacidade, de 3.535 megawatts para 5.300 megawatts. Quando o Parque Eólico do Alto Minho entrou em funcionamento, em 2008, era o maior parque eólico da Europa. As estações de energia eólica de Portugal são modulares, o que significa que mais turbinas podem ser adicionadas para cada estação, aumentando gradualmente a produção de eletricidade.
- **Dinamarca:** um quinto da demanda de eletricidade da Dinamarca é suprido pela energia eólica gerada pelas grandes estações do país, *onshore* e *offshore*. A *Horns Rav 2*, a maior estação de energia eólica *offshore* do mundo, pode produzir energia suficiente para abastecer 200.000 residências. No início da década, as estações de energia eólica da Dinamarca possuíam uma potência de 3.465 megawatts. Aproximadamente metade das turbinas de vento instaladas no mundo são produzidas por fabricantes dinamarqueses. O governo do país acredita que a quota de vento na produção de eletricidade aumentará se a rede de distribuição nacional for melhorada.

3.2 Estudos sobre o potencial eólico brasileiro

Desde os anos 1970, a capacidade do Brasil de produzir energia elétrica utilizando a força eólica tem sido o foco de pesquisas, estudos e inventários, gerando

uma coleção de dados que revela um devagar porém constante descobrimento de um potencial para tal produção de grande importância e tamanho que há no país. A partir da medição e processamento de dados anemométricos feitos em aeroportos, foram constatadas as maiores velocidades médias anuais dos ventos, sendo de 4m/s a 10m de altura, o que já indicava uma viabilidade, ao menos técnica, para a utilização de máquinas de baixas capacidades, e apontavam para o litoral da região Nordeste e o para o arquipélago de Fernando de Noronha como os locais mais promissores para a criação de um sítio para a realização de projetos-piloto para a geração de energia e eólio-elétrica (CRESESB, 2001).

Entre os anos de 1977 e 1981, foi construído um inventário com dados relativos ao potencial eólico da região Nordeste, feito a partir de coleta e processamento de dados anemográficos de 81 estações a 10 m de altura, pertencentes à Rede Meteorológica do Nordeste (SUDENE), mostrando uma velocidade média anual, na altura mencionada, entre 4,3m/s e 5,5m/s (CHESF, 1987). Devido a esses e outros estudos, foi observada a tendência de maiores velocidades do vento no litoral brasileiro e em áreas do interior favorecidas por características geográficas (relevo, baixa rugosidade).

Porém, muitos dos dados coletados até o final da década de 1980 foram excluídos, devido ao fato de que a maioria dos resultados obtidos a altura máxima de 10 m, durante o período da pesquisa, foram mascarados pela influência geográfica do local no qual se realizaram as medidas, que não era necessariamente igual nos pontos em que as máquinas para a produção de energia estavam instaladas (CRESESB, 2001). Apesar de existir a possibilidade de correção de tais dados, não havia meios para isso na época, e, mesmo que houvesse, aplicá-los em todo o país significaria altos custos e longos prazos, além de que, sendo uma correção, haveria também incerteza de resultados (CRESESB, 2001).

Na década de 1990, foram iniciadas coletas de dados específicos para inventários de potencial eólico para torres de maior altura (≥ 20 m), instaladas em determinadas regiões do Brasil, a saber: litoral do Ceará e Estados da Bahia, Minas Gerais e Paraná (CRESESB, 2001). A partir das primeiras medições dessa década na região Nordeste, a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF), em 1996, realizou um estudo sobre o potencial eólico do litoral do Ceará e do Rio Grande do

Norte, e a partir de simulações computacionais para turbinas de 500 kW e 600 kW, constatou-se a possibilidade de geração de 9,55 TWh/ano e 2,96 TWh/ano com a utilização de 10% dos litorais cearense e potiguar, respectivamente (CRESESB, 2001).

Ainda na mesma década, foram realizadas coletas de dados feitas durante 5 anos em 25 locais especificamente selecionados, para torres de 18 m a 64 m de altura no Estado do Paraná, para a produção do “Mapa do Potencial Eólico do Estado do Paraná”, publicado pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL), em 1999, revelando áreas de grande potencial no seu interior, e também uma capacidade de produção da ordem de 5,8 TWh/ano, fazendo-se uso apenas de áreas com velocidades médias anuais maiores que 6,5m/s (CRESESB, 2001).

Assim, iniciaram-se as instalações das primeiras usinas eólicas no Brasil, e com o avanço da utilização da energia eólio-elétrica, as primeiras medições anemométricas mais específicas para estudos de viabilidade, com a utilização de torres de 30-50 m, foram iniciadas, concentrando-se nos estados do Pará, Ceará, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o que possibilitou a criação do “Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará”, mostrando velocidades médias anuais no litoral cearense de 9m/s, uma capacidade de geração de 12 TWh/ano para alturas de 50 m, e 51,9 TWh/ano para alturas de 70m, considerando a velocidade média anual dos ventos no local (CRESESB, 2001).

3.2.1 O potencial eólico brasileiro estimado

De acordo com todos os estudos, pesquisas e processamento dos dados coletados desde seus inícios, pôde-se realizar uma estimativa para a capacidade de produção de energia elétrica a partir da eólica para cada região do país. Através da integração dos mapas digitais, da utilização de recursos de geoprocessamento e cálculos de desempenho e produção de energia elétrica, oriundos das curvas de potência de turbinas eólicas disponíveis no mercado, obteve-se os seguintes dados de capacidade de geração de energia eólio-elétrica para o Brasil (apresentados na Tabela 2, a seguir), considerando-se a velocidade média anual dos ventos de 7m/s, e a área cumulativa de suas ocorrências (CRESESB, 2001):

Tabela 2 - Valores relativos à capacidade eólico-elétrica do Brasil.

Região	Vento (m/s)	Área Cumulativa (km²)	Potência Instalável (GW)	Energia Anual (TWh/h)
Norte	7 m/s	6.420	12,84	26,45
Nordeste	7 m/s	37.526	75,05	144,29
Centro-Oeste	7 m/s	1.541	3,08	5,42
Sudeste	7 m/s	14.869	29,74	54,93
Sul	7 m/s	11.379	22,76	41,11

Fonte: CRESESB (2001)

Totalizando para o Brasil, uma área cumulativa de 71.735 km², uma potência instalável de 143,47 GW e uma capacidade energética anual de 272,20 TWh/ano (CRESESB, 2001).

3.3 Energia eólica no estado do Maranhão

O estado do Maranhão possui um potencial eólico que tem sido o foco de estudos, pesquisas e análises relativos a sua capacidade e viabilidade apenas recentemente. No início da década, foi anunciado pelo secretário estadual de Indústria e Comércio, que existe um planejamento de pesquisa eólica para a elaboração, feita pelo governo, de um atlas referente ao potencial dos ventos no território maranhense, com a finalidade de nortear as atividades em tal área no estado. Além dos estudos para a construção do Atlas Eólico Maranhense, outras instituições/empresas o fazem por iniciativa própria, para a realização de empreendimentos eólicos no estado. Dentre tais empresas, se destacam a Bioenergy Geradora de Energia e a Omega Energia.

A Bioenergy Geradora de Energia, em um leilão realizado em 20 de dezembro de 2011, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cadastrou 15 parques eólicos, que formam um empreendimento que totaliza 432 MW (TERRA,

2011). Ao final daquele mesmo ano, a Bioenergy estava com um investimento da ordem de 6 bilhões de reais, para a geração de 1.400 MW. No leilão mencionado, a empresa conseguiu fechar a venda de duas usinas eólicas, que juntas correspondem a uma capacidade instalada de 57,6 MW.

As plantas arrematadas foram as de Morro dos Ventos I e II, que participaram do leilão em caráter liminar e integrariam o conjunto do parque eólico de 50 usinas que a Bioenergy pretendia instalar nos Municípios de Tutóia e Paulino Neves, no litoral leste do estado. As usinas fechadas em acordo receberiam, cada uma, um investimento da ordem de 105.970.000,00 reais em suas instalações.

De acordo com os investidores, o parque eólico estava previsto para ocorrer em três fases, sendo que a última seria neste ano. A área total para a implantação do empreendimento nos dois municípios é de 20.000 hectares, sendo que o principal fator que atraiu o investimento para o estado foi o potencial dos ventos.

A construção das usinas eólicas seria iniciada no primeiro semestre de 2012, segundo o presidente da Bioenergy, logo após o leilão no qual foram contratadas da empresa 57.6 MW de potência. Com tal contratação somada às contratações no mercado livre de energia, a empresa daria início à implantação de 230 MW até 2014, com investimentos da ordem de 900 milhões de reais.

No começo das obras, seriam gerados aproximadamente 300 empregos diretos, e no pico das atividades, que era previsto para 2013 e 2014, a geração de empregos alcançaria um total de 2.000 vagas diretas nos dois municípios onde seriam instalados os empreendimentos. Para permitir o escoamento da energia gerada, a Bioenergy também construiria uma linha de transmissão.

Porém, o projeto não foi concretizado, devido à divergências entre a Bioenergy e a prefeitura de Paulino Neves, por questões ambientais consideradas pelo governo do município.

A Omega Energia, outra empresa do ramo, possui um projeto para a construção de sete parques eólicos no Maranhão, com investimentos de aproximadamente 1 bilhão de reais. O empreendimento deverá começar a gerar energia a partir de 2018 (BRASIL 247, 2015).

Os sete parques da Omega terão 84 torres com capacidade para 193,2 MW, e integraram um complexo eólico que a empresa começou a instalar no Piauí, que já possui três usinas em operação.

Nesse projeto, não há participação do governo do estado, sendo os recursos da própria empresa, com serviços da gestora Tarpon Investimentos e do fundo americano Warburg Pincus. As torres serão instaladas em Barreirinhas (MA) e Parnaíba (PI).

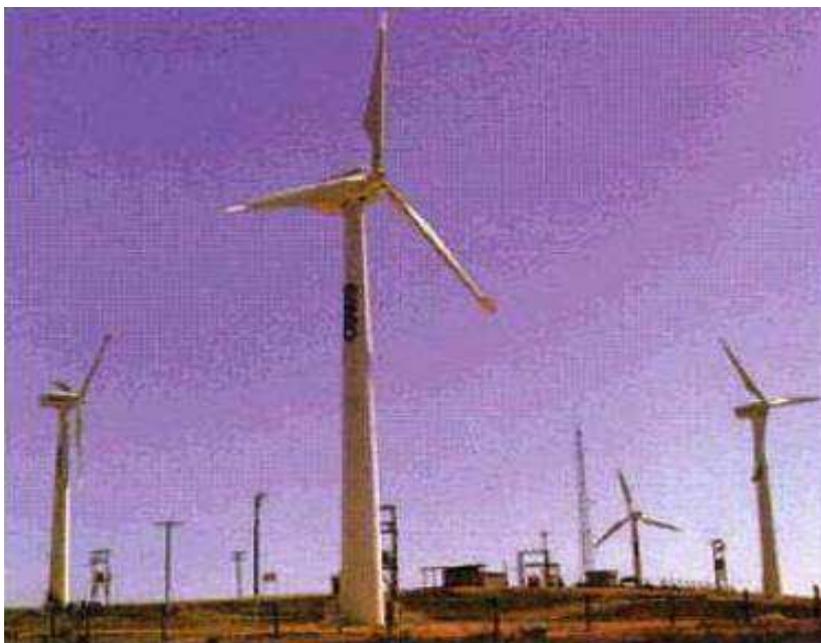
4 PARQUES EÓLICOS

4.1 Definição

Um parque eólico, ou também usina eólica, é a denominação de uma determinada região do espaço, terrestre ou marítimo, na qual se encontram conjuntos de aerogeradores que têm por finalidade a produção de energia elétrica através da transformação da energia eólica, como mostrado nas Figuras 7 e 8.

Muitas vezes, dependendo do julgamento do órgão ambiental estadual em questão, é necessário a realização de Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) para a construção de um parque, devido ao fato de que, se localizado incorretamente, pode gerar impactos negativos, como acidentes com pássaros e poluição sonora (as hélices de uma turbina produzem um ruído constante). Contudo, os fabricantes afirmam que modelos mais novos não geram mais ruídos que o próprio vento que gira as hélices.

Figura 8 - Exemplo de parque eólico terrestre



Fonte: CRESESB (2001)

Figura 9 - Exemplo de parque eólico marítimo



Fonte: CRESESB (2001)

4.2 Etapas da implantação de um parque eólico

A implantação de um parque eólico segue as seguintes etapas (ELETROCURIOSIDADES, 2012):

4.2.1 Projeto

Nas turbinas eólicas, o vento gira suas hélices, que são conectadas a aerogeradores, produzindo eletricidade. Quando essas turbinas estão conectadas a uma central de transmissão de energia, tem-se a constituição de um parque eólico (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Para sua instalação, é necessário a contratação de vários pesquisadores e engenheiros de diversas áreas, como ambiental, civil, elétrica, mecânica, entre outras. A etapa inicial da implantação de uma usina eólica é a definição da área de operação da mesma, juntamente com a análise do potencial eólico de tal área (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Estabelecido o local, é realizada, durante aproximadamente o período de um ano, a medição dos ventos ocorrentes na localidade, para se estabelecer, ao menos

uma estimativa, da velocidade média dos ventos anual para a geração de energia elétrica (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Além do valor da velocidade dos ventos, também é importante que os mesmos sejam constantes, ou apresentem uma boa regularidade (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Para a garantia da viabilidade do parque, as condições topográficas e de vegetação também são levadas em consideração nessa etapa do projeto (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Definidos o potencial e o local, a próxima etapa é realizada, que é a de *Micrositing*, que são especificações gerais do parque eólico, devendo conter o layout da usina, tipo de máquina, fabricante, altura das turbinas, potência, estimativa de geração anual de energia elétrica e capacidade máxima de produção. Nessa fase, também são feitos estudos e pesquisas relativos ao solo e à infraestrutura para o abastecimento da energia, em relação à distância até a subestação mais próxima, e ao plano logístico para a distribuição da eletricidade gerada (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

No projeto, também deve estar incluído um estudo ambiental e socioeconômico (de acordo com o entendimento do órgão ambiental em questão, como mencionado), de forma que o parque cause o menor impacto ambiental possível para a região. Além disso, a área também deve estar regularizada e com as respectivas licenças ambientais atualizadas (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

A escolha do aerogerador é realizada depois do término do *Micrositing*, devido ao fato de que a quantidade de energia produzida por uma turbina varia de acordo com o tamanho das suas hélices, assim como com o regime de ventos predominante na região (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Somente após a obtenção de todos os parâmetros e dados mencionados durante a fase de projeto que se é possível a determinação das viabilidades técnicas e econômicas (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

4.2.2 Instalação

Após a aprovação do projeto, é dado início à instalação dos equipamentos necessários para o funcionamento do parque eólico.

Porém, antes de se proceder à instalação dos aerogeradores, é necessário se fazer a limpeza do terreno e fazer sua terraplanagem, com nivelamento e pavimentação dos acessos às máquinas. Feito isso, se segue para o estaqueamento, que consiste na fixação de estacas nas bases dos aerogeradores para sua conexão com o solo. Tais estacas serão, posteriormente, incorporadas ao bloco da fundação, para prover sustentação à torre do aerogerador (ELETROCURIOSIDADES, 2012). Após a incorporação, é iniciada a concretagem da base dos equipamentos. Essa etapa é constituída de três subetapas (ELETROCURIOSIDADES, 2012):

- Montagem das ferragens;
- Montagem das conexões elétricas e civis, necessárias para a transmissão de energia;
- Por fim, concretagem da base.

Após a secagem do concreto, dá-se início à montagem das torres, que são divididas em blocos sobrepostos. Durante essa fase, as montagens das subestações unitárias, de transição e principal da usina, também são feitas (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Feitas tais montagens, a interligação elétrica entre os aerogeradores e as subestações são construídas, através de cabos subterrâneos, e concomitantemente são montadas as linhas de transmissão aéreas, conectando o parque à subestação coletora (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

Erguida a torre, instala-se o suporte no qual fica o gerador e o sistema de transmissão de energia. Então monta-se o gerador, etapa que é complicada, porque para sua realização é preciso se ter condições atmosféricas ideais (ventos muito fortes impossibilitam sua instalação). Finalmente, conectá-se as pás ao aerogerador. Porém, antes do funcionamento efetivo da usina, cada turbina passa por avaliações e testes de tensão e produção de eletricidade (ELETROCURIOSIDADES, 2012).

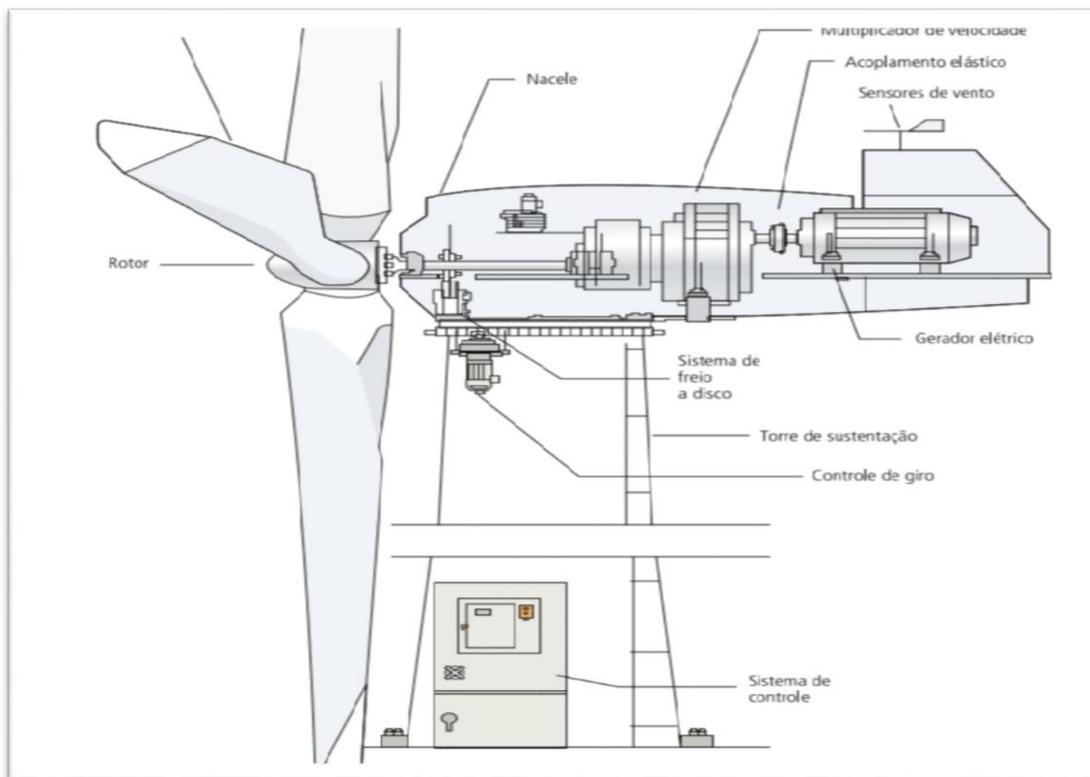
4.2.3 Funcionamento

O funcionamento de um aerogerador, ou turbina eólica, ocorre da seguinte maneira:

1. A força do vento faz com que as pás da hélice girem, propulsionando um rotor. Este se conecta com o eixo principal, que move um gerador.
2. Dentro da turbina, existe um multiplicador de velocidade, que gira o rotor, permitindo que o gerador produza eletricidade.
3. A eletricidade produzida é enviada por cabos que descem pelo interior da torre da turbina, e se conectam com uma rede de energia.

Ele envolve todos os componentes de que um aerogerador dispõe, que são mostrados na Figura 9, a seguir, requerendo que os mesmos trabalhem em conjunto.

Figura 10 - Esquema de turbina eólica



Fonte: CBEE/UFPE (2000)

4.2.3.1 Componentes de uma turbina eólica

Uma turbina eólica é constituída, basicamente, pelas seguintes partes (CASTRO, 2005):

- Rotor e pás: O desenvolvimento de perfis e modos de alocação das pás no rotor foi possibilitado em grande parte pela tecnologia usada nas asas dos aviões. O desempenho de um aerogerador depende do ângulo em que as pás são fixadas ao

rotor. Outro fator que influencia esse desempenho é o número de pás usadas. O aproveitamento da energia dos ventos é aumentado entre 3 e 5% quando se aumenta a quantidade de pás de 2 para 3, porém, a partir desse ponto a adição de pás diminui o desempenho, fato pelo qual as turbinas possuem 2 ou 3 pás, o que também as torna mais leves.

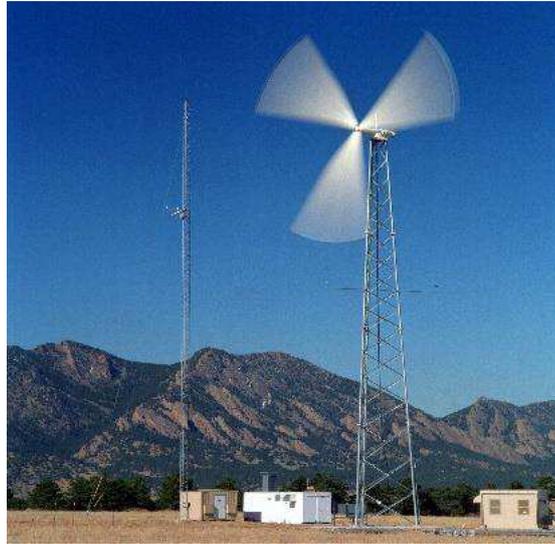
- **Cabina:** É o local no qual se encontram o mecanismo que possibilita a orientação da direção do rotor, o gerador, a caixa de velocidades e o eixo principal. O sistema de direção fica localizado na parte superior da cabina, juntamente com o anemômetro e o sensor de direção do vento, para que haja controle em relação aos comandos de partida e desligamento da turbina (ventos acima de 5 m/s acionam a turbina, e acima de 25 m/s a desligam) e para controlar a direção da turbina em relação ao vento, respectivamente; o gerador é o responsável pela transformação da energia mecânica do eixo de rotação em energia elétrica; a caixa de velocidades aumenta a velocidade do eixo do gerador; e o eixo principal transfere a energia mecânica disponível em sua rotação para o eixo do gerador através da caixa de velocidades.
- **Torre:** Responsável pela sustentação do rotor à altura necessária para o aproveitamento eólico eficiente. Pode possuir uma perfil estaqueado, treliçado ou tubular, estes últimos mostrados nas Figuras 10 e 11.

Figura 11 - Exemplo de torre tubular



Fonte: NREL (2001)

Figura 12 - Exemplo de torre treliçada



Fonte: NREL (2001)

4.3 Principais parques eólicos mundiais

Com a tendência do aumento da utilização e da expansão da tecnologia eólica ao redor do mundo, muitos parques foram implantados, em diversos países, tendo em vista as vantagens proporcionadas por eles. Dentre esses parques, se destacam (PORTAL ENERGIA, 2010):

- **Horse Hollow Wind Energy Center:** é um grande parque eólico, que se situa abrangendo áreas de duas cidades, que são Taylor e Nolan County, no estado do Texas, Estados Unidos, totalizando 47.000 acres. Possui 735.5 MW de capacidade, sendo constituído por 291 turbinas de 1.5 MW e 139 turbinas de 2.3 MW.
- **Tehachapi Pass Wind Farm:** é um complexo que contém várias usinas eólicas, sendo um dos primeiros parques de grande porte a ser instalado na Califórnia, Estados Unidos (sendo a maior área de recursos eólicos daquele estado). Seus parques possuem desde turbinas de apenas uma pá, passando por aquelas que trabalham com duas até as turbinas mais avançadas que operam com 3 pás. As mais antigas geram uma potência de ordem de kilowatts, enquanto as mais modernas chegam a até 3 megawatts, dependendo do fabricante. Possui uma capacidade nominal de 705 MW.

- **San Gorgonio Pass Wind Farm:** situado na cidade de Riverside Country, Estados Unidos, teve seu projeto iniciado na década de 1980, e é um dos principais 3 parques eólicos da Califórnia, juntamente com outros dois do complexo Tehachapi Pass Wind Farm. Seu local de operação é um dos com mais incidência de ventos do estado. Consiste de 3.218 unidades, produzindo 615 MW.
- **Altamont Pass Wind Farm:** localizado na região central da Califórnia, Estados Unidos, é composto por 4930 turbinas (relativamente pequenas) de vários tipos. É o parque que apresenta a maior concentração de turbinas eólicas no mundo, totalizando uma capacidade de 576 MW.
- **Sweetwater Wind Farm:** situado nos Estados Unidos. É constituído de 5 fases: na fase 1 foram utilizadas 25 turbinas de 1.5 MW; na fase 2, 61 turbinas de também 1.5 MW; na fase 3, 90 turbinas de mesma capacidade que as anteriormente mencionadas; na fase 4, foram implantadas 135 turbinas de 1 MW e 46 de 2.3 MW, e na fase 5, 35 turbinas de também 2.3 MW, totalizando 505 MW de potência.
- **Peetz Table Wind Energy Center:** situado na cidade de Peetz, Colorado, Estados Unidos, foi construído em duas fases. A primeira foi concluída em 2001, e tinha uma capacidade de aproximadamente 30 MW. Em 2007, o proprietário do projeto (Next Era Energy Resources) adicionou ao parque 400 MW, totalizando, assim, sua capacidade instalada em 430 MW. Utilizou 33 turbinas na primeira fase de operação, e 267 na segunda.
- **Buffalo Gap Wind Farm:** assim como o Horse Hollow Wind Energy Center, também fica situado nas cidades de Nolan Country e Taylor, no estado do Texas, Estados Unidos. Foi construído em 3 fases. A primeira consiste de 67 turbinas de 1.8 MW cada, totalizando uma capacidade de 120.6 MW. A segunda foi uma expansão de 232.5 MW da primeira, com a utilização de 155 turbinas de 1.5 MW. A terceira fase adicionou 170 MW ao parque, através do uso de 74 turbinas de 2.3 MW.
- **Maple Ridge Wind Farm:** é o maior parque eólico no estado de Nova York, Estados Unidos. Situado na cidade de Lewis County, possui 195 turbinas eólicas de 1.65 MW, e em sua capacidade total, pode produzir um máximo de 321 MW.

- **Whitelee Wind Farm:** é o maior parque eólico terrestre do Reino Unido. Possui 215 turbinas eólicas, totalizando uma capacidade de 539 MW.
- **Thorntonbank Wind Farm:** é um parque eólico marítimo, localizado na costa da Bélgica. Foi construído em duas fases, sendo que a primeira consistiu da instalação de 6 turbinas de 5 MW, e na segunda, foram adicionadas 48 turbinas de 6.15 MW, dando ao parque uma capacidade total de 325 MW.
- **Stateline Wind Farm:** localizado na cidade de Vansycle Ridge, recebe ventos da ordem de 26 a 29 km/h, na fronteira entre os estados do Oregon e Whashington, nos Estados Unidos. Atualmente possui 186 turbinas eólicas, totalizando uma potência de 222 MW, e 279 outras planejadas para intalação, o que elevará sua capacidade para 307 MW.
- **King Mountain Wind Farm:** situado na cidade de Upton County, no estado do Texas, Estados Unidos, possui 214 turbinas eólicas de 1.3 MW cada, totalizando uma potência de 278.2 MW. Foi concluído em 2001, e anualmente gera aproximadamente 750 GWh.
- **Parque Eólico do Alto Minho:** é um parque eólico localizado na região do Alto Minho, no norte de Portugal, e possui uma capacidade total de 290 MW.
- **Wild Horse Wind Farm:** localizado na cidade de Kittitas County, no estado de Whashington, Estados Unidos, possui 127 turbinas de 1.8 MW e 22 de 2 MW, em uma área de 10.800 acres.
- **Blue Canyon Wind Farm:** é o maior parque de Oklahoma, nos Estados Unidos. Consiste de 3 fases: Blue Canyon I, que possui 45 turbinas eólicas de 1.65 MW, totalizando uma capacidade de 74.25 MW; Blue Canyon II, que possui 84 turbinas de 1.8 MW, totalizando uma potência de 151.2 MW; e Blue Canyon V, constituído por 66 turbinas de 1.5 MW, totalizando uma capacidade de 99 MW. O complexo como um todo possui uma potência da ordem de 324.45 MW.
- **Roscoe Wind Farm:** Localizado na cidade de Roscoe, no estado do Texas, Estados Unidos, é um dos parques com maior capacidade do mundo. Possui 634 turbinas eólicas, com uma capacidade total instalada da ordem de 781.5 MW. Foi construído em 4 fases: a primeira foi concluída em 2008, e consiste de 209 turbinas de 1 MW; a segunda foi completada também em 2008, consistindo de 55 turbinas de 2.3 MW; a terceira adicionou 166 turbinas de 1.5 MW; e a quarta fase, 197 turbinas de 1 MW.

- **Parque Eólico de Maranchón:** Localizado no município de Maranchón, na Espanha, é um dos parques eólicos de maior potência do continente europeu, totalizando uma capacidade instalada de 208 MW.
- **Fenton Wind Farm:** Localizado em uma área que abrange o território das cidades de Murray County e Nobles County, no estado do Minnesota, Estados Unidos, consiste de 137 turbinas de 1.5 MW, com uma capacidade total instalada de 205.5 MW.
- **New Mexico Wind Energy Center:** Oficialmente aberto em no dia primeiro de outubro de 2001, fica localizado no estado do Novo México, nos Estados Unidos. Possui 136 turbinas eólicas, com uma potência instalada de 200 MW.
- **Vankusawade Wind Park:** Localizado em uma parte a 1.150m de altura, em uma montanha acima da reserva Koyana, na Índia, possui uma capacidade total instalada de 210 MW.

4.4 Principais parques eólicos no Brasil

Foram contabilizados 207 parques eólicos no Brasil pelo Banco de Informações da ANEEL (atualizados em 27 de novembro de 2014), totalizando uma potência da ordem de 4.363.603,53 KW. A maioria dos principais, que possuem maior capacidade, estão situados na região Nordeste, com alguns na região Sudeste, que são a Central Eólica de Praia Formosa, o Complexo de Bons Ventos, o Parque Eólico Alegria, o Parque Eólico Cidreira I, o Parque Eólico de Bons Ventos, o Parque Eólico dos Índios, o Parque Eólico de Miassaba III, os Parques Eólicos Rei dos Ventos I e III, a UEE Canoa Quebrada, a Usina Icaraizinho, a Usina de Osório e a Usina de Sangradouro. Segue abaixo uma descrição mais detalhada sobre cada parque mencionado:

- **Central Eólica de Praia Formosa:** situada no município de Camocim, na região litorânea do estado do Ceará, possui 50 aerogeradores de 2,1 MW, totalizando uma potência instalada de 104,1 MW. O parque faz parte do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (**ρ**) e estabeleceu um contrato com a Eletrobrás para o fornecimento de energia até 2029, com um valor contratado de 416.678 MWh/ano.

- **Complexo de Bons Ventos:** situado no estado do Ceará, constituído pelas Usinas de Aracati e Taiba. Possui uma potência total instalada de 155 MW, com capacidade para a produção de 559,5 GWh/ano, contando com 75 aerogeradores de 2.100 KW (projeto também habilitado pelo PROINFA).
- **Parque Eólico Alegria:** é considerado o maior parque eólico do Brasil, sendo formado pelas Usinas Eólicas Alegria I e II, localizadas no município de Guamaré, no estado do Rio Grande do Norte. Possui uma potência instalada total de 151,9 MW, da qual 51,15 MW são para a unidade de Alegria I e 100,65 MW para a unidade de Alegria II, o suficiente para abastecer uma cidade com até 200.000 moradias, além de evitar a emissão de 120.000 t/ano de CO₂.
- **Parque Eólico Cidreira I:** situado no município de Tramandaí, no estado do Rio Grande do Norte, é constituído por 31 aerogeradores de 1.9 a 2.3 MW, com torres de 98 metros de altura e pás de 40 metros, totalizando uma potência instalada de 70 MW e produção estimada de 211.437 MWh/ano, com capacidade para atender a uma cidade com até aproximadamente 140.000 moradias.
- **Parque Eólico de Bons Ventos:** está localizado no município de Arati, no estado do Ceará, e possui uma capacidade da ordem de 50 MW.
- **Parque Eólico dos Índios:** situado no município de Osório, no estado do Rio Grande do Sul, possuindo uma potência total instalada de 50 MW, com 25 aerogeradores de 2 MW cada, torres com 100 metros de altura e pás com 70 metros.
- **Parque Eólico de Miassaba III:** situado no estado do Rio Grande do Norte, possui 41 turbinas eólicas, que produzem 68,5 MW (o projeto do parque foi viabilizado pelo primeiro leilão com o intuito de contratação de energia eólica, seus investidores são a Eletronorte, a Furnas, a Bioenergy e a J. Malucelli).
- **Parques Eólicos Rei dos Ventos I e III:** situados no município de Dunas de Galinhos no estado do Rio Grande do Norte, é constituído por 71 aerogeradores com torres de 80 metros de altura, pás de 40 metros e potência total de 118,6 MW.
- **UEE Canoa Quebrada:** situada também no município de Aracati, no estado do Ceará, possui capacidade de 57 MW, e juntamente com o Parque Eólico de Bons Ventos, podem abastecer uma cidade com até aproximadamente 140.000 moradias.

- **Usina Icaraizinho:** situada na cidade de Paracuru, no estado do Ceará, possui uma capacidade total de 54 MW.
- **Usina de Osório:** também situada no estado do Rio Grande do Sul, com potência instalada total de 50 MW, 25 aerogeradores de 2 MW cada, torres com 100 metros de altura, e pás com 70 metros.
- **Usina de Sangradouro:** também situada no estado do Rio Grande do Sul, com potência instalada total de 50 MW, 25 aerogeradores de 2 MW cada, torres com 100 metros de altura, e pás com 70 metros. Juntamente com o Parque Eólico dos Índios e a Usina de Osório, formam um complexo que foi uma iniciativa do projeto Ventos do Sul, idealizado pela empresa Enerfin Enervento, com auxílio do PROINFA e financiado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), em 2005. A construção foi concluída no final do ano seguinte. Segundo dados do projeto, o complexo evita a emissão de 148.325 toneladas de CO₂, 28.325 toneladas de contaminantes (SO, NO, poeira e cinzas) e o consumo de 36.550 toneladas de petróleo e 4.252.889 m³ de gás natural.

5 PERSPECTIVA DO USO DA ENERGIA EÓLICA NO CONTEXTO ATUAL

5.1 No mundo

Em 2014, foi publicada a 15ª edição do *Global Wind Energy Outlook - GWEO* (Perspectiva Mundial da Energia Eólica), uma colaboração do Conselho Mundial de Energia Eólica e a organização não governamental de ambiente *Greenpeace*. O *GWEO* possui a finalidade de analisar o futuro da indústria eólica para os anos 2020, 2030 e 2050. Baseados no cenário da nova política da Agência Internacional de Energia (AIE), foram desenvolvidos dois outros cenários, para a análise proposta: o cenário Moderado da *GWEO* e o cenário Avançado de *GWEO*.

Os cenários Moderado e Avançado da *GWEO* envolvem anos de colaboração entre o Conselho Mundial de Energia Eólica, o *Greenpeace*, e o Centro Aeroespacial da Alemanha, *Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt (DLR)*. Esses cenários para o futuro da energia eólica têm contribuído para uma série de pesquisas – ainda em andamento – sobre os percursos que a energia sustentável pode percorrer até 2050, conduzidas pelo *DLR* e o *Greenpeace*. A seguir, se encontra uma breve descrição dos objetivos e dos supostos em que se baseiam os cenários mencionados.

5.1.1 Cenário Novas Políticas da AIE

Este cenário é baseado em análises das direções e planos das políticas, tanto nacionais quanto internacionais, da energia e do clima, ainda que não estejam formalmente incorporadas como decisões, ou expressamente fixadas em uma lei. Exemplos incluem os objetivos de reduções de emissões adotados em Cancún 2010, os vários compromissos com a energia renovável, eficiência energética, e os acordos firmados por governos em fóruns como o G-8 e o G-20.

5.1.2 Cenário Moderado da *GWEO*

O cenário Moderado da *GWEO* possui muitas das características do cenário da AIE, levando em consideração todas as medidas políticas para suportar a energia renovável, tanto aquelas já em vigor como aquelas em estágio de planejamento ao redor do mundo, ao mesmo tempo em que assume que os compromissos aceitos pelos governos em Cancún para a redução de emissões serem implementados, ainda que de forma modesta.

5.1.3 Cenário Avançado da *GWEO*

Este cenário é o mais ambicioso, e analisa de um ponto de vista no qual a indústria da energia eólica crescerá, se a energia eólica se desenvolver ao seu máximo potencial, sempre tendo em conta a capacidade atual industrial e estabelecendo um crescimento sempre viável para o futuro.

Pressupõe um compromisso inequívoco com a energia renovável de acordo com as recomendações industriais, o compromisso político com as normas adequadas e a firmeza para manter-se com elas. Também pressupõe que os governos aprovaram uma norma clara e eficiente sobre a redução de emissões de carbono.

5.1.4 Resultado dos cenários

De acordo com os objetivos e os pressupostos em que se baseiam cada um dos cenários brevemente descritos acima, formularam-se as seguintes previsões, mostradas abaixo:

5.1.4.1 Resultados do Cenário de Novas Políticas da AIE

Os resultados deste cenário são expostos nas Tabelas 3 e 4, a seguir:

Tabela 3 - Resultados do cenário de Novas Políticas da AIE.

Ano	Capacidade Global Cumulativa (GW)	Crescimento Anual Global (%)	Instalações Anuais (MW)	Produção (TWh)
2013	318	-	35.467	620
2015	395	11	39.485	969
2020	573	6	34.324	1.406
2025	732	4	30.472	1.794
2030	880	3	29.540	2.312
2035	1.025	3	68.390	2.695
2040	1.184	3	68.089	3.111
2045	1.330	2	58.289	3.496
2050	1.471	2	57.912	3.865

Fonte: Adaptado de GWEO (2014)

Tabela 4 - Continuação dos resultados do Cenário de Novas Políticas da AIE.

Ano	Participação da Energia Eólica em Eletricidade (%) (Alta Demanda)	Participação da Energia Eólica em Eletricidade (%) (Baixa Demanda)	Redução de CO₂ (com 600g de CO₂/kWh) (milhões de ton./ano)	CO₂ Evitado Desde 2007 (milhões de ton./ano)
2013	2.9	2.9	372	2.265
2015	4.7	4.8	582	2.332
2020	6.2	6.7	844	6.037
2025	-	-	1.077	10.965
2030	8.4	9.4	1.387	17.096
2035	-	-	1.617	24.723
2040	10	11	1.867	33.542
2045	-	-	2.098	43.583
2050	11	13	2.319	54.734

Fonte: Adaptado de GWEO (2014)

5.1.4.2 Resultados do Cenário Moderado da GWEO

Os resultados deste cenário são expostos nas Tabelas 5 e 6, a seguir:

Tabela 5 - Resultados do Cenário Moderado da GWEO.

Ano	Capacidade Global Cumulativa (GW)	Crescimento Anual Global (%)	Instalações Anuais (MW)	Produção (TWh)
2013	318	-	35.467	620
2015	413	14	49.131	1.013
2020	712	10	65.799	1.747
2025	1.073	8	76.250	2.631
2030	1.480	6	84.698	3.889
2035	1.804	4	122.049	4.740
2040	2.089	3	131.883	5.491
2045	2.374	3	145.174	6.238
2050	2.672	2	156.394	7.023

Fonte: Adaptado de GWEO (2014)

Tabela 6 - Continuação dos resultados do Cenário Moderado da *GWEO*.

Ano	Participação da Energia Eólica em Eletricidade (%) (Alta Demanda)	Participação da Energia Eólica em Eletricidade (%) (Baixa Demanda)	Redução de CO₂ (com 600g de CO₂/kWh) (milhões de ton./ano)	CO₂ Evitado Desde 2007 (milhões de ton./ano)
2013	2.9	2.9	372	2.265
2015	4.9	5.0	608	3.424
2020	7.2	7.8	1.048	7.930
2025	-	-	1.578	15.100
2030	12.9	14.5	2.333	25.420
2035	-	-	2.844	39.116
2040	15.2	17.3	3.294	55.249
2045	-	-	3.743	73.669
2050	17.0	20.2	4.214	94.463

Fonte: Adaptado de GWEO (2014)

5.1.4.3 Resultados do Cenário Avançado da *GWEO*

Os resultados deste cenário são expostos nas Tabelas 7 e 8, a seguir:

Tabela 7 - Resultados do Cenário Avançado da *GWEO*.

Ano	Capacidade Global Cumulativa (GW)	Crescimento Anual Global (%)	Instalações Anuais (MW)	Produção (TWh)
2013	318	-	35.467	620
2015	420	15	54.400	1.031
2020	801	13	91.273	1.964
2025	1.326	9	113.125	3.253
2030	1.934	7	127.799	5.083
2035	2.506	5	162.564	6.586
2040	3.024	3	192.749	7.948
2045	3.533	3	214.925	9.284
2050	4.042	3	229.790	10.624

Fonte: Adaptado de GWEO (2014)

Tabela 8 - Continuação dos resultados do Cenário Avançado da *GWEO*.

Ano	Participação da Energia Eólica em Eletricidade (%) (Alta Demanda)	Participação da Energia Eólica em Eletricidade (%) (Baixa Demanda)	Redução de CO₂ (com 600g de CO₂/kWh) (milhões de ton./ano)	CO₂ Evitado Desde 2007 (milhões de ton./ano)
2013	2.9	2.9	372	2.265
2015	5.0	5.1	619	3.438
2020	8.1	8.8	1.178	8.312
2025	-	-	1.952	16.904
2030	16.8	18.9	3.050	30.151
2035	-	-	3.952	48.802
2040	22.0	25.0	4.769	71.793
2045	-	-	5.571	98.908
2050	25.7	30.6	6.374	130.138

Fonte: Adaptado de GWEO (2014)

5.2 No Brasil

O Brasil possui aproximadamente 250 MW de capacidade eólica instalada, com destaque para o estados do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Norte e Ceará (CNI, 2009). Algumas das usinas eólicas em operação no país estão enquadradas no PROINFA, criado pela Lei 10.438/2002, que visa incentivar a geração de energia elétrica por fontes alternativas no Brasil no curto e longo prazos.

De acordo com o Atlas Eólico do Brasil, o potencial eólico estimado brasileiro é da ordem de 143 GW (medido com torres de 50 m de altura). Para se ter uma ideia do tamanho dessa capacidade, todo o parque gerador brasileiro tem, aproximadamente 100 GW instalados, considerando-se todas as fontes.

Assim como no cenário mundial, a expansão do parque eólico brasileiro depende de planos muito bem organizados e estruturados de longo prazo sobre a expansão do sistema de geração elétrica, e de apoios e de incentivos governamentais. Em relação à indústria fornecedora de equipamentos para a geração eólica, no final da década passada, o país contava somente com três empresas: *Wobben Wind Power*, *Tecsis*, e *South America Wind Energy*. Considerando-se que aproximadamente 75% dos custos de instalação de uma usina eólica são provenientes dos equipamentos, ampliar a gama de fornecedores se torna um passo importante para o desenvolvimento da área (CNI, 2009).

Devido a essa situação, os custos relacionados com a instalação de parques eólicos no país ainda são bem elevados, sendo esse um dos principais motivos para explicar o pequeno grau de adesão do PROINFA e a falta de projetos eólicos no primeiro leilão de fontes alternativas, realizado em 2007, pela ANEEL, no qual cerca de 639 MW foram negociados, sendo a maior parte térmicos.

O PROINFA trabalha com três ramos energéticos, que são usinas à biomassa, pequenas centrais hidrelétricas e aerogeradores. Dentre tais ramos, o último ainda apresenta o custo de energia produzida mais alto. Os aerogeradores inscritos no PROINFA possuem de valores de R\$ 219/MWh a R\$ 234/MWh, sendo que tais preços situam-se em patamares acima daqueles praticados por países que possuem maior utilização de tal equipamento.

Porém, estudos realizados pelo Banco do Nordeste em 2008 mostram que a energia eólica pode contribuir para a modicidade tarifária no modelo elétrico brasileiro, apesar de possuir um custo elevado, quando comparado com fontes convencionais (aproximadamente R\$ 200/MWh).

De acordo com o mesmos estudos, o custo médio das usinas térmicas nos leilões de energia situava-se na faixa de R\$ 140/MWh; contudo, o custo da energia térmica quando despachada depende do atual valor do preço do combustível utilizado, da situação dos reservatórios hídricos, do fornecimento de gás, do preço das *commodities*, e de todos os outros fatores relacionados que, dependendo de seus estados, podem contribuir para o aumento do custo da energia (no final da década passada chegou a R\$ 570/MWh, e atualmente, devido à crise hídrica, o país trabalha com a bandeira vermelha nos preços de energia elétrica).

Assim, apesar de possuir um custo de instalação superior ao das usinas térmicas, as usinas eólicas possuem um custo de operação baixo, pois não paga pelo combustível que utiliza (o vento), de modo que, ao longo do tempo de operação, o custo da energia térmica cresce em uma taxa superior ao da energia eólica, e a partir de um determinado momento, esta se torna mais barata que aquela.

O resultado dessa análise é que o investimento em geração eólica é uma decisão relacionada com os resultados esperados para a matriz energética no médio e longo prazos (de onde se mostra a importância do planejamento de longo prazo

relacionado à forma de como se dará a expansão do sistema de geração elétrica nacional).

5.2.1 Oportunidades e desafios no caso brasileiro

A expansão do parque eólico brasileiro apresenta os seguintes pontos em seu favor (CNI, 2009):

- A população está concentrada na faixa litorânea, na qual se encontra a maior parte do potencial eólico do país, o que torna possível diminuir os custos com transmissão e as perdas técnicas, já que assim as usinas eólicas podem ser instaladas próximas aos centros de consumo;
- Os ventos nos sítios de maior capacidade possuem, em média, altas velocidades que são normalmente estáveis, permitindo um menor gasto com equipamentos;
- Existe uma complementaridade bem forte e bem exata entre os períodos chuvosos e de vento ao longo do ano no país, com destaque ao Nordeste, o que possibilita que a energia eólica supra a demanda de energia durante as estações secas, permitindo que as grandes hidrelétricas possam acumular água em seus reservatórios;
- A produção de energia elétrica através da eólica pode ser grandemente utilizada na generalização do acesso à energia, através da geração distribuída (áreas rurais e isoladas), o que diminuiria drasticamente o emprego de combustíveis fósseis nesses locais;
- As torres eólicas podem ser instaladas em áreas de proteção ambiental, o que facilita o licenciamento;
- As usinas eólicas são modulares, e possibilitam o uso da terra para várias atividades, podendo garantir renda aos proprietários das mesmas;
- O tempo de conclusão de instalação de parques eólicos é relativamente curto, de 1 a 2 anos;
- As unidades operadoras não emitem poluentes atmosféricos, o que contribui para a redução de gases do efeito estufa decorrentes de outras fontes;
- O combustível utilizado é gratuito (o vento).

Contudo, pontos negativos, em particular do cenário político-institucional, precisam ser aperfeiçoados, visando uma maior competitividade dessa alternativa à energia. Dentre eles, se destacam(CNI, 2009):

- A impossibilidade de armazenamento da energia eólica, o que torna necessário melhorias técnicas e regulatórias para um modelo apropriado de despacho;
- Impactos sonoros e ambientais (poluição visual) podem atingir a indústria do turismo, em particular;
- Existe a possibilidade de interferência eletromagnética, que pode causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão de dados;
- Há necessidade de aperfeiçoamentos das modalidades contratuais para atender às especificações do setor, os prazos de contratação da energia precisam ser mais longos, e as condições de financiamento devem ser aprimoradas;
- Falta de competitividade da fonte eólica em relação às fontes convencionais de geração, tornando necessário a implantação de políticas de incentivo para sua implantação e/ou de tarifação sobre os custos ambientais decorrentes da geração com fontes convencionais;
- O estado inicial da indústria de equipamentos eólicos no Brasil, o que torna mais difícil o atendimento aos índices de nacionalização previstos no PROINFA, e aumenta os custos de instalação e manutenção dos empreendimentos, além da carência de políticas de desenvolvimento e incentivos à pesquisa tecnológica dessa indústria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O aproveitamento da energia eólica apresenta pontos positivos por vários fatores. Sua utilização, que ocorre por meio de uma fonte renovável, não implica a emissão de poluentes que possam prejudicar o meio-ambiente (apesar de que em alguns casos existe a produção de ruídos, poluição visual ou interferência de sinais por causa da instalação), e não apresenta custos inerentes ao combustível que utiliza (o vento), tornando-a assim, mais competitiva.

Além dessas vantagens, além do fato de tal fonte não ser poluente, seu uso contribui para a redução das emissões já ocorrentes, ao passo que colabora para a diversificação da matriz energética, de forma a diminuir a utilização de fontes que de alguma forma agredem a natureza.

No mundo, a produção de energia elétrica através da força dos ventos já se encontra em um bom nível de desenvolvimento e continua progredindo. Muitos países, a maioria europeus, possuem planos bem organizados, estruturados e definidos para altos investimentos no setor, destacando assim sua importância.

O Brasil, apesar de possuir um excelente potencial eólico e condições técnicas e econômicas para a energia eólica, ainda se encontra em um estágio inferior ao de outros lugares do planeta. O uso de tal fonte ainda se encontra abaixo do total que pode ser aproveitado, e isso se deve principalmente à falta de organização governamental, de um planejamento que apresente propósitos bem definidos relativos à implantação (nos locais nos quais há viabilidade e não a possuem) e/ou expansão. Porém, mesmo com a baixa utilização, as usinas existentes no país contribuem significativamente para o abastecimento da população, principalmente daquela mais próxima aos centros de produção eólica.

No estado do Maranhão, a situação se encontra em uma fase ainda menos desenvolvida que a encontrada no Brasil como um todo. No passado, alguns projetos na área foram até iniciados, mas não foram concluídos, devido à entraves políticos. Atualmente, o que existe relacionado à produção eólica em território maranhense são apenas novos projetos, ainda em andamento.

Considerando-se a situação atual, algumas hipóteses e possibilidades, a perspectiva de aumento do uso da energia eólica no mundo e no Brasil é positiva. No

mundo, a expansão do setor se dará de forma mais intensa que no Brasil, devido principalmente à diferenças culturais e governamentais. Alguns entraves que muitas partes do planeta já superaram para a implantação e/ou instalação da produção eólica ainda existem no Brasil, dificultando o desenvolvimento da área no país.

Assim, para que haja avanço, desenvolvimento e progresso no setor eólico brasileiro, é preciso que o governo do país aja de acordo com esse objetivo, de forma a solucionar e/ou eliminar todos os impecílios que dificultam ações de melhoria para a área e que possibilite a criação de planos bem estruturados, organizados e definidos para investimentos no setor, para que, assim, consiga-se cumprir tal meta, haja vista as vantagens que ela propicia e sua grande importância.

REFERÊNCIAS

ABEEOLICA, Associação Brasileira de Energia Eólica. Disponível em: <<http://www.abeeolica.org.br/site/zpublisher/secoes/home.asp>>. Acesso em: 10 out. 2015.

ABRADEE. Leilões de energia. Disponível em <<http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/leiloes-de-energia>>. Acesso em: 11 out. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da energia eólica**. [S.l.], [200-].

ALVES, Jose Jackson Amancio. **Análise regional da energia eólica no Brasil**. Universidade Estadual da Paraíba, Guarabira, 2009.

ANEEL: BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO. Capacidade de geração do Brasil. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>>. Acesso em: 9 dez. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA EÓLICA. **Energia eólica no mundo: perspectivas**. Brasília, DF, 2007.

BRAMETAL. Brametal fecha parceria com empresas alemãs e vai produzir torres treliçadas para aerogeradores. Disponível em http://www.brametal.com.br/_conteudo/2013/8/noticias/91-brametal-fecha-parceria-com-empresas-alemas-e-vai-produzir-torrestrelicadas-para-aserogeradores.html>. Acesso em: 20 out. 2015.

BRASIL 247: MARANHÃO 247. Maranhão vai ganhar sete parques eólicos. Disponível em <
<http://www.brasil247.com/pt/247/maranhao247/196307/Maranh%C3%A3o-vai-ganhar-sete-parques-e%C3%B3licos.htm>>. Acesso em: 14 out. 2015.

BROZATTI, Fabricio Luís; NETO, Alfredo Iarozinski. **Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010 a 2030**. Artigo apresentado no XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro, 2008.

BUENO, Cecília. **Conservação de biodiversidade nos parques urbanos: o caso do parque nacional da tijuca**. Dissertação de Mestrado em Gestão Ambiental, UNESA, Rio de Janeiro, 1998.

CASTRO, Rui M.G. **Energias renováveis e produção descentralizada**. Introdução à energia eólica. 2.1 ed. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA DE SALVO BRITO. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília, DF: Atlas, 2001.

CHESF. **Fontes energéticas brasileiras - energia eólica**. Volume III, [S.l.], 1987.

CHESF-BRASCEP. **Fontes energéticas brasileiras, inventário/tecnologia. Energia eólica**. De cata-ventos a aerogeradores: o uso do vento, Rio de Janeiro, 1987.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Energia eólica: panorama mundial e perspectivas no Brasil**. Brasília, DF, 2009.

DANTAS, Guilherme de A. Leite; SILVA, André Luís da. **Os custos da energia eólica brasileira**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Artigo Científico do Grupo de pesquisa do setor eólico. Rio de Janeiro, 2009.

ELETROCURIOSIDADES. Etapas da construção de um parque eólico. Disponível em < <http://eletrocuriosidades.blogspot.com/2012/10/etapas-da-construcao-de-um-parque-eolico.html>>. Acesso em: 12 out. 2015.

ENERGIA EÓLICA: POTENCIAL EÓLICO. Potencial eólico no mundo. Disponível em < <https://tudosobreenergiaeolica.wordpress.com/2012/09/28/potencial-eolico/>>. Acesso em: 9 out. 2015.

EXPLICATORIUM: ENERGIA EÓLICA. Como funciona? O seu desenvolvimento. Disponível em: <<http://www.explicatorium.com/Energia-eolica.php>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

FILHO, Altino Ventura. **O Brasil no contexto energético mundial**. Volume 6, Brasília, DF: Naippe, 2009.

GREENPEACE INTERNATIONAL. **Global wind energy outlook**. 15 ed. [S.l.], 2014.

GREENPEACE INTERNATIONAL. **Perspectiva mundial de la energia eólica**. [S.l.], 2012.

IM TERRAPLANAGEM. Bioenergy começará obras de parque eólico no Maranhão. Disponível em <www.imterraplanagem.com.br/blog-18>. Acesso em: 11 out. 2015.

INVESTIMENTOS E NOTÍCIAS. Energia eólica comercializa 769,1 MW no leilão LER 2014. Disponível em <<http://www.investmentosenoticias.com.br/noticias/negocios/energia-eolica-comercializa-769-1-mw-no-leilao-ler-2014>>. Acesso em: 11 out. 2015.

JORNAL PEQUENO. Maranhão produzirá energia eólica a partir de 2014. Disponível em <<http://www.jornalpequeno.com.br/2013/07/24/maranhao-produzira-energia-eolica-a-partir-de-2014/>>. Acesso em: 11 out. 2015.

MARIA, Paulo Henrique Santiago de; COSTA, Alexandre Araújo Sombra; SOUSA, Sérgio. **Modelagem numérica em alta resolução para a previsão de energia eólica no Ceará.** FUNCEME, DEMET, UECE, MCFA. Revista Brasileira de Meteorologia, v.23, n.4, 477 - 489, [S.l.], 2008.

MARTINS, Fernando; GUARNIERE, R.A.; PEREIRA, E.B. **O aproveitamento da energia eólica.** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 30, n. 1, 1304, [S.l.], 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia eólica no Brasil e no mundo.** Brasília, DF, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energias renováveis.** São Paulo, SP, 2007.

NREL - National Renewable Energy Laboratory. Arquivos de fotos. Disponível em <<http://www.nrel.gov/>>. Acesso em: 19 nov. 2015.

PIQUEIRA, José Roberto Castilho; BRUNORO, Claudio Marcelo. **Energia:** uso, geração e impactos ambientais, São Paulo: Anglo Sistema de Ensino, [200-].

PORTAL ENERGIA: ENERGIAS RENOVÁVEIS. Os maiores parques eólicos do mundo. Disponível em < <http://www.portal-energia.com/os-maiores-parques-eolicos-do-mundo/>>. Acesso em: 13 out. 2015.

PORTAL ENERGIA: ENERGIAS RENOVÁVEIS. Vantagens e desvantagens da energia eólica. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/vantagens-desvantagens-da-energia-eolica/>>. Acesso em: 7out. 2015.

REHFELDT, K.; CHRISTIAN, S. **Windenergienutzung in der Bundesrepublik Deutschland.** Stand 31.12.2000. [S.l.]: Dewi Magazin, Wilhelmshaven, n.18, Feb. 2001.

SIMIONI, Carlos Alberto. **O uso de energia renovável sustentável na matriz energética brasileira:** obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis. Tese de Doutorado-UFPR, Curitiba, 2006.

TERRA. Bioenergy cadastra 432 MW de eólicas no Maranhão no leilão A-5. Disponível em < <http://economia.terra.com.br/bioenergy-cadastra-432-mw-de-eolicas-do-maranhao-no-leilao-a-5,cfda95246a40b310VgnCLD200000bbcceb0aRCRD.html>>. Acesso em: 14 out. 2015.

THE WINDICATOR: Operating Wind Power Capacity. [S.l.]: Windpower Monthly, v.17, n.4, Apr. 2001.

TORREY, V. **Wind catchers**, american windmills of yesterday and tomorrow. [S.l.]: The Stephen Greene Press, 1976.

TURBINAS EÓLICAS. Introdução. Disponível em <http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/eolica_turbina.php>. Acesso em 18 dez. 2015.

WESCHENFELDER, Franciele; SCHAEFFER, Lirio. **Situação atual e perspectivas da produção de energia elétrica a partir da geração eólica no Brasil**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.