



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

**ESTUDOS E ANÁLISES DA ENERGIA EÓLICA COMO
FONTE COMPLEMENTAR À HIDRELETRICIDADE NA
REGIÃO NORDESTE DO BRASIL**

DIEGO PEREIRA CAVALCANTI

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2013

DIEGO PEREIRA CAVALCANTI

ESTUDOS E ANÁLISES DA ENERGIA EÓLICA
COMO FONTE COMPLEMENTAR À
HIDRELETRICIDADE NA REGIÃO NORDESTE DO
BRASIL

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

Orientador:
Professor Leimar de Oliveira, M. Sc.

Campina Grande, Paraíba
Maio de 2013

DIEGO PEREIRA CAVALCANTI

ESTUDOS E ANÁLISES DA ENERGIA EÓLICA
COMO FONTE COMPLEMENTAR À
HIDRELETRICIDADE NA REGIÃO NORDESTE DO
BRASIL

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

Aprovado em: 31 / 05 / 2013

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

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

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram a chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças em diversos momentos de minha vida em que achei não ser possível chegar onde hoje estou.

A minha Mãe que sempre foi o meu porto seguro e minha conselheira fiel. Aos meus irmãos Carla, Camila e Gustavo por estarem sempre ao meu lado e por crescermos juntos como pessoas e família.

Agradeço a minha esposa Raissa, por sempre estar ao meu lado mesmo em momentos difíceis. Ao meu filho Eduardo, razão maior do meu esforço e dedicação.

Por fim, agradeço aos amigos pelos momentos vividos e ao meu professor orientador Leimar de Oliveira, por transmitir seus conhecimentos sem perder o seu carisma.

“Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena acreditar nos sonhos que se tem.”

Renato Russo.

RESUMO

O presente trabalho faz uma análise da energia eólica, buscando seu melhor aproveitamento como fonte renovável para geração de energia elétrica. O centro de interesse do mesmo estará na abordagem de diversos aspectos que a envolvem, desde sua origem, explanação sobre seu campo de aplicação, vantagens e desvantagens até projeções futuras. Por fim, é apresentado um estudo dos regimes pluviométricos e de ventos no Nordeste Brasileiro, suas sazonalidades e são demonstrados os graus de complementaridade entre esses dois tipos de geração de energia elétrica, ressaltando a importância para o futuro da Matriz Elétrica Brasileira.

Palavras-chave: Energia Eólica, Complementaridade Sazonal e Regime Hidrológico.

ABSTRACT

The present study is an analysis of wind power, seeking its best use as a renewable source for electricity generation. The center of interest is in addressing various aspects that involve, from its origin, explanation of their scope, advantages and disadvantages to future projections. Finally, we present a study of winds and rainfall regimes in Brazilian Northeast and their seasonality are shown the degree of complementarity between these two types of power generation, highlighting the importance for the future of the Brazilian Energy Matrix.

Keywords: Wind Energy, Seasonal Complementarity and Hydrological Regime.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Detalhes da complexidade de um moinho de vento holandês.....	5
Figura 2. Exemplo de um cata-vento de múltiplas pás instalado no Quênia.....	6
Figura 3. Distribuição geral do vento.....	7
Figura 4. Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas.....	10
Figura 5. Curva típica de potência de turbinas eólicas.....	11
Figura 6. Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna.....	12
Figura 7. Turbinas Eólicas (pequena, média e grande porte).....	14
Figura 8. Representação de um rotor tipo Savonius.....	15
Figura 9. Representação do rotor tipo Darrieus.....	16
Figura 10. Rotor de eixo horizontal com multipás.....	17
Figura 11. Rotor de eixo horizontal com tripás.....	17
Figura 12. Tendência do crescimento eólico até 2020.....	19
Figura 13. Projeção da evolução de potência instalada no Brasil.....	21
Figura 14. Evolução do potencial de energia eólica instalado no mundo de 2001 a 2011.....	24
Figura 15. Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura.....	27
Figura 16. Esquema do poste de iluminação pública alimentado por energia eólica e solar.....	29
Figura 17. Vista noturna do complexo Bahrain World Trade Center.....	30
Figura 18. Complementaridade hidro-eólica no Sistema Nordeste.....	34
Figura 19. Vazão Afluente no Reservatório de Sobradinho, 1931/1992.....	35
Figura 20. Regimes sazonais das energias eólica e hidráulica.....	36
Figura 21. Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento no nordeste do Brasil.....	38
Figura 22. Energia Hidráulica (Sul) e Energia Eólica em Palmas - Normalizadas - período 1979-1992.....	39
Figura 23. Complementaridade hidro-eólica no sub-sistema Sudeste.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Aproveitamento nos períodos secos e úmidos.....	36
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TEEV - turbina eólica de eixo vertical

TEEH - turbina eólica de eixo horizontal

BWTC - Bahrain World Trade Center

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CHESF - Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco

UFMG - Universidade Federal de Campina Grande

ELETRONBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

PIE – Produção Independente de Energia

NE - Nordeste

UF – Unidade Federativa

A – Ampère

V – Volt

kV – quilovolt (10^3 V)

MVA – Megavoltampère (VA)

W – Watt

kW – quilowatt (W)

MW – Megawatt (W)

GW – Gigawatt (W)

TW – Terawatt (W)

RPM – Rotações por minuto

m² – metro quadrado

W/m² – Watt por metro quadrado

m – metro

m/s – metro por segundo

MWh - Megawatt (W) por hora

TWh - Terawatt (W) por hora

TWh/ano – Terawatt (W) por hora por ano

GWh – Gigawatt (W) por hora

mm – milímetro

°C– Grau Celsius

US\$ - Dólar Americano

US\$ /MWh – Dólar Americano / megawatt por hora

R\$ - Real Brasileiro

R\$ /MWh – Real Brasileiro / megawatt por hora

ONSHORE – Tradução: Em terra firme, na costa

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

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

CC - Corrente contínua

CA - Corrente alternada

VV - Velocidade do vento

SUMÁRIO

1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Estrutura do Trabalho.....	2
2 Fundamentação Teórica	3
2.1 Introdução à Energia Eólica	3
2.2 Histórico da Energia Eólica.....	4
2.3 O vento.....	7
2.3.1 Geração dos Ventos.....	7
2.3.2 Energia e Potência Extraída do Vento.....	8
2.4 A Turbina Eólica	12
2.5 Impactos Ambientais	18
2.6 A Perspectiva de Futuro da Energia Eólica	18
3 O Panorama da Energia Eólica.....	22
3.1 Capacidade Instalada no Mundo	22
3.2 O Potencial Eólico Brasileiro.....	24
4 O Estado da Arte	28
4.2 Poste de Iluminação Pública Alimentado por Energia Eólica e Solar.....	28
4.2 Edifícios Auto-Suficientes em Energia.....	30
5 Estudos e Análises da Energia Eólica como Fonte Complementar à Hidreletricidade	32
5.1 Experiências Internacionais em Interação Hidro/Eólica	32
5.2 Estudo de Caso: Complementaridade Sazonal Hidro-Eólica na Região Nordeste do Brasil.....	33
6 Conclusão	40
Bibliografia.....	41

1 INTRODUÇÃO

A energia é um bem essencial à vida moderna como se conhece, não apenas na produção, mas na base de toda tecnologia que aumentou a qualidade e a expectativa de vida do homem em todo esse desenvolvimento. No entanto, todo o processo desde a geração, passando pela transmissão, distribuição e utilização, tem repercussões ambientais. No novo paradigma da energia elétrica, o consumo desenfreado dá lugar a utilização eficiente e a geração a partir de fontes renováveis.

Algumas dessas fontes renováveis visam aproveitar sistemas naturais de movimento como o vento. Mas ao contrário de uma hidrelétrica onde se pode armazenar a água, regular a vazão, determinar a altura de uma represa ou de uma termoelétrica onde se pode controlar o estoque de carvão, óleo combustível e gás, o sistema eólico esta entregue à imponderabilidade. Dada a vulnerabilidade associada a este recurso energético, é primordial a utilização de um conjunto vasto de tecnologias que permitam aumentar o fator de segurança do abastecimento.

O recurso eólico está associado a um grau elevado de volatilidade e variabilidade que desde cedo se traduz em problemas de Segurança de Abastecimento - Considerando a possibilidade de avarias das unidades produtoras, a variabilidade do recurso eólico e a necessidade de garantir a cobertura dos consumos por intermédio dos meios de produção disponíveis, e a necessidade de conhecer previamente uma estimativa acerca da produção eólica; Gestão dos Parques Eólicos - a definição de períodos de manutenção e poderá exigir o pré-despacho e o despacho dos aerogeradores com o objetivo de responder a solicitações do operador do sistema.

Assim a correta estimação do recurso eólico é de fundamental importância para o sucesso e a sua participação na Matriz Elétrica Brasileira.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho visa oferecer conhecimentos sobre os princípios fundamentais do uso da Energia Eólica, bem como suas aplicações atreladas às tecnologias desenvolvidas atualmente em prol da modernização tecnológica desta fonte alternativa de energia.

Aspectos econômicos e custos, mapas e potenciais eólicos nacionais, modelos de turbinas, componentes dos aerogeradores, além de tendências futuras serão alguns dos temas apresentados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica. Nele é feito um levantamento sobre a origem do aproveitamento dos ventos como fonte de energia, e traz um histórico sobre o desenvolvimento da energia eólica ao longo dos tempos. Explica o processo de geração dos ventos e como se dá a extração de energia e potência através dos mesmos. Falará sobre as turbinas eólicas, mostrando seu desenvolvimento e classificação. Depois abordará sobre os impactos ambientais existentes e finalizará mostrando suas perspectivas de futuro.

No capítulo 3 será abordado o panorama da energia eólica, estando subdividido nos seguintes temas: capacidade instalada no mundo e o potencial eólico brasileiro.

O tema central do capítulo 4 é o estado da arte, sendo este o nível mais alto de desenvolvimento, indicando o ponto em que o produto em questão deixa de ser um projeto técnico para se tornar uma obra-prima. Será mostrado a aplicabilidade e modelos inovadores de sustentabilidade da energia eólica, tendo como exemplos postes de iluminação pública alimentados por energia eólica e solar e edifícios auto-suficientes em energia.

Já no capítulo 5, será visto a energia eólica como fonte complementar à hidroeletricidade. Este será dividido em dois tópicos. Um irá relatar sobre as experiências internacionais em interação hidro/eólica, no outro será analisado um estudo de caso sobre a complementaridade sazonal hidro-eólica na região nordeste do Brasil.

O capítulo 6 é conclusivo. Tem como objetivo mostrar as constatações verificadas ao longo do trabalho realizado e finalizará com uma explanação sobre o que foi evidenciado durante revisão bibliográfica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será feita uma revisão sobre diversos temas que envolvem a energia eólica, abordando desde sua origem e desenvolvimento, explanando sobre aspectos econômicos e custos, até suas tendências futuras.

2.1 INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA

A energia elétrica é hoje um elemento vital, sendo base de sustentação do desenvolvimento econômico e dos altos padrões de vida que atualmente se verificam. Face ao contínuo crescimento da população mundial, é essencial que se diversifique as fontes de energia primária e se amplie num curto prazo de tempo, a eficiência dos sistemas de conversão de energia de modo a atender, de forma sustentada e equilibrada, ao previsível aumento de demanda de energia elétrica no futuro.

Dentre as fontes primárias usualmente exploradas para a geração de eletricidade, os combustíveis fósseis (petróleo, carvão e gás natural) ainda são os mais utilizados pela maioria das centrais elétricas em todo o mundo. No entanto, devido às preocupações relativas à disponibilidade em longo prazo dos combustíveis fósseis e também aos impactos ambientais produzidos por subprodutos da geração de eletricidade, muitos países têm investido em tecnologias que exploram sobretudo as “novas” fontes de energia renováveis, como a eólica, solar, biomassa, geotérmicas, ondas e marés, entre outras. Neste contexto, a energia eólica tem se destacado dentro do conjunto específico das energias renováveis, por oferecer maior maturidade tecnológica para a produção de eletricidade.

A exploração da energia do vento há muito tempo que é realizada pelo homem, porém, somente no final do século XX é que a sua utilização para a geração de eletricidade, em grande escala comercial, teve relevante impulso, nomeadamente, em países europeus e nos Estados Unidos onde se desenvolveu uma sólida indústria de produtos e componentes de avançada tecnologia. Estes países têm comprovado que a utilização desta energia na produção de eletricidade é tecnicamente e economicamente viável, o que faz dela uma das mais promissoras fontes de energia.

A energia cinética contida nas massas de ar em movimento é o que se chama de energia eólica. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação com o emprego das turbinas eólicas, aerogeradores, para geração de eletricidade.

O vento é gerado principalmente pelo aquecimento da superfície da Terra nas regiões próximas ao Equador e pelo resfriamento nas regiões próximas aos pólos, fazendo com que os ventos das superfícies frias circulem dos pólos em direção ao Equador para substituir o ar quente tropical que, por sua vez, desloca-se para os pólos.

O primeiro aerogerador de grande dimensão foi construído na França em 1929, e era constituído de duas pás com 20 metros de diâmetro. Assim como outros de grandes dimensões fabricados na época, todos foram destruídos por tormentas. Os problemas estruturais para enfrentar ventos de grande intensidade foram corrigidos e hoje em dia existem diversos com capacidade de 2.500 kW, diâmetro de pás superiores a 90 metros, funcionando há mais de 20 anos.

Recentes desenvolvimentos tecnológicos vêm reduzindo os custos e melhorado a confiabilidade e desempenho dos equipamentos. Os custos destes, que eram bastante elevados, reduziu significativamente nas últimas décadas, deixando de ser um dos principais problemas para o aproveitamento comercial desse tipo de energia.

2.2 HISTÓRICO DA ENERGIA EÓLICA

Os primeiros aproveitamentos da força dos ventos pelo homem têm data bastante imprecisa, mas, certamente, ocorreram há milhares de anos, no Oriente. Eram provavelmente máquinas que utilizavam a força aerodinâmica de arrasto, sobre placas ou velas, para produzir trabalho.

A estimativa que existe é que a partir da Idade Média o homem passou a utilizar em maior escala as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo as grandes navegações e também maior eficiência às máquinas eólicas. Possivelmente, máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI. O certo é que no século XIV, na Holanda, essas máquinas, conforme mostrado na Figura 1, já apresentavam grande evolução técnica e de

capacidade em potência e ampla aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água.

À época da descoberta do Brasil, em 1500, haviam milhares de moinhos de vento em toda a Europa e durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram sua aplicação expandida na Europa, como na fabricação de papel para atender à demanda após a invenção da imprensa, em produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem. Porém, com a expansão do uso de máquinas a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso.

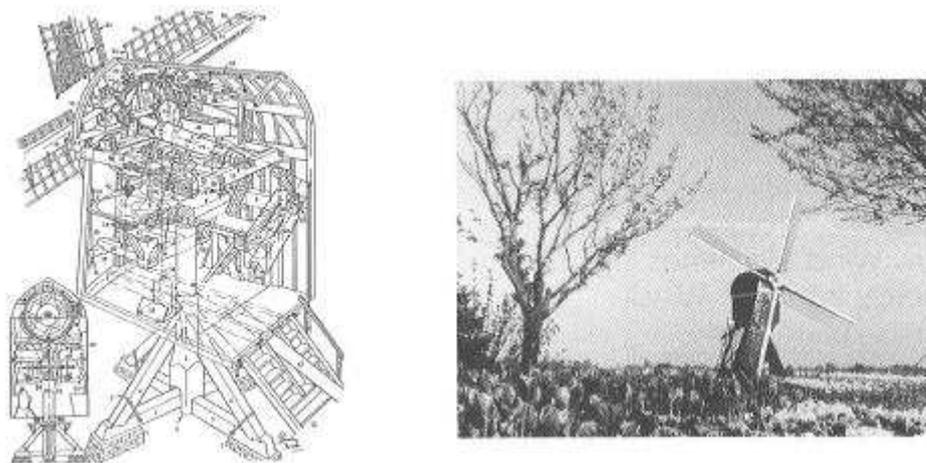


Figura 1 - Detalhes da complexidade de um moinho de vento holandês.
<7>.

Em diversos países, em especial nas suas áreas rurais, a utilização de cata-ventos de múltiplas pás, Figura 2, destinados ao bombeamento d'água desenvolveu-se de forma efetiva. Acredita-se que desde a segunda metade do século XIX mais de seis milhões de cata-ventos já teriam sido fabricados e instalados somente nos Estados Unidos para o bombeamento d'água em sedes de fazendas isoladas e para abastecimento de bebedouros para o gado em pastagens extensas.

Os cata-ventos de múltiplas pás foram usados também em outras regiões como a Austrália, Rússia, África e América Latina. O sistema se adaptou muito bem às condições rurais tendo em vista suas características de fácil operação e manutenção. Toda a estrutura era feita de metal e o sistema de bombeamento era feito por meio de bombas e pistões favorecidos pelo alto torque fornecido pela grande número de pás. Até hoje esse sistema é largamente usado em várias partes do mundo para bombeamento d'água.



Figura 2 – Exemplo de um cata-vento de múltiplas pás instalado no Quênia.
<7>.

Para a geração de energia elétrica, também nos Estados Unidos, a partir da década de 1930, iniciou-se uma ampla utilização de pequenos aerogeradores para carregamento de baterias, o que favoreceu o acesso à energia elétrica aos habitantes do meio rural. Entre 1930 e 1960, dezenas de milhares desses aerogeradores foram produzidos e instalados nos Estados Unidos, bem como exportados para diversos países.

A geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que existe há diversas décadas. Desde a fase experimental, ressaltam-se os primeiros aproveitamentos eólio-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos (Smith-Putnam) e Dinamarca (Gedser). Pode-se dizer que o precursor das atuais turbinas eólicas surgiu na Alemanha (Hütter, 1955), já com pás fabricadas em materiais compostos, controle de passo e torre tubular esbelta.

Na década de 1970 e até meados da década de 1980, após a primeira grande crise de preços do petróleo, diversos países – inclusive o Brasil – aumentaram seus esforços em pesquisa sobre utilização da energia eólica para a geração elétrica. Data dessa época a turbina DEBRA 100 kW, desenvolvida em conjunto entre os institutos de pesquisa aeroespacial do Brasil e da Alemanha, de onde originou-se o nome: DEBRA, Deutsche Brasileira.

Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólio-elétrico atingiu escala de contribuição mais significativa ao sistema elétrico, em termos de geração e economia.

O desenvolvimento tecnológico passou a ser conduzido pelas nascentes indústrias do setor em regime de competição alimentadas por mecanismos institucionais de incentivo – especialmente via remuneração pela energia produzida.

Por se mostrar uma forma de geração praticamente inofensiva ao meio ambiente, sua instalação passou a simplificar os minuciosos e demorados estudos ambientais requeridos pelas fontes tradicionais de geração elétrica, bastando, em muitos casos, aos poderes concedentes a delimitação das áreas autorizadas para sua instalação. Esse último fato, aliado às escalas industriais de produção de turbinas, tornaram a geração eólico-elétrica uma das tecnologias de maior crescimento na expansão da capacidade geradora.

2.3 O VENTO

2.3.1 GERAÇÃO DOS VENTOS

Como os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, a energia proveniente do sol se manifesta produzindo como uma de suas formas a energia eólica. A orientação dos raios solares e os movimentos da Terra são responsáveis por essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera.

As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Assim, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina, portanto, a formação dos ventos e esse mecanismo é representado na Figura 3 abaixo.

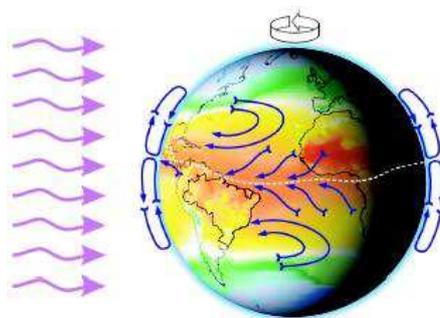


Figura 3 – Distribuição geral do vento.<9>.

Existem locais no globo terrestre nos quais os ventos jamais cessam, pois os mecanismos que os produzem - aquecimento no Equador e resfriamento nos pólos - estão sempre presentes na natureza. São chamados de ventos planetários ou constantes e possuem classificação elencadas a seguir:

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

Como o eixo da Terra possui uma inclinação de $23,5^\circ$ em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado, surgem os ventos continentais ou periódicos e compreendem as monções e as brisas.

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

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

2.3.2 ENERGIA E POTÊNCIA EXTRAÍDA DO VENTO

Uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor é captada por uma turbina eólica que a transforma em energia elétrica. A fórmula apresentada a seguir calcula a potência gerada pelas turbinas eólicas.

$$P = \frac{W}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que:

P – Potência;

W – trabalho;

Δt – intervalo de tempo.

A potência P é igual ao trabalho W dividido pelo tempo. Neste caso o trabalho realizado pelo vento é igual a sua energia cinética E_c . Logo:

$$W = E_c = \frac{m.v^2}{2} \quad (2)$$

Em que:

W – trabalho;

E_c – energia cinética;

m – massa;

v – velocidade do vento.

Então:

$$P = \frac{\frac{m.v^2}{2}}{\Delta t} = \frac{m.v^2}{2\Delta t} \quad (3)$$

Outra expressão importante, derivada da equação (3) supracitada está abaixo representada:

$$P = \frac{\rho.v^3.A}{2} \quad (4)$$

Em que:

P – Potência;

ρ - massa específica do ar;

v - velocidade do vento;

A – área varrida pelo rotor.

Uma turbina eólica capta uma parte da energia cinética do vento que passa através da área varrida pelo rotor e a transforma em energia elétrica. Vale ressaltar que esta regra é teórica. Na prática, não se consegue converter toda essa potência (teórica) em potência útil. A taxa de conversão (η – rendimento) varia de 20 a 59%, quando o sistema funciona de maneira otimizada.

Da equação 4 pode-se constatar que se em determinada localidade quando a velocidade do vento aumenta em 10%, a potência se eleva em 33%, o que demonstra como é importante a escolha de um lugar com vento mais veloz para o melhor aproveitamento da energia eólica.

A distância à jusante da turbina varia com a velocidade do vento, as condições de operação da turbina, a rugosidade de terreno e a condição de estabilidade térmica vertical da atmosfera. De modo geral, uma distância considerada segura para a instalação de novas turbinas é da ordem de 10 vezes o diâmetro d , se instalada a jusante, e 5 vezes d , se instalada ao lado, em relação ao vento predominante, conforme ilustrado na Figura 4.

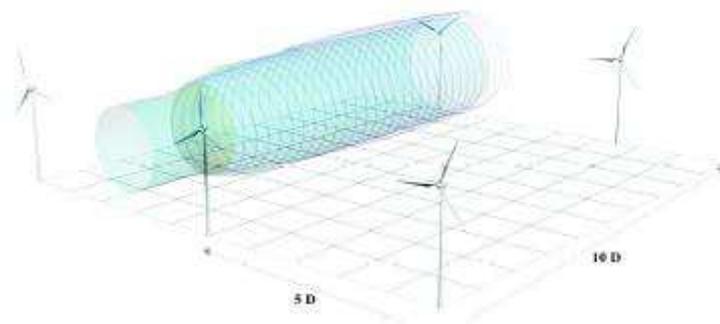


Figura 4 – Esteira aerodinâmica e afastamento entre turbinas eólicas.
<9>.

A velocidade angular do rotor é inversamente proporcional ao diâmetro d . Usualmente, a rotação é otimizada no projeto, para minimizar a emissão de ruído aerodinâmico pelas pás. Uma fórmula prática para a avaliação da rotação nominal de operação de uma turbina eólica é:

$$rpm = \frac{1150}{d} \quad (5)$$

Onde:

rpm – rotação nominal da turbina;

d – diâmetro da turbina.

A Figura 5 abaixo mostra uma curva típica de potência de turbinas eólicas:

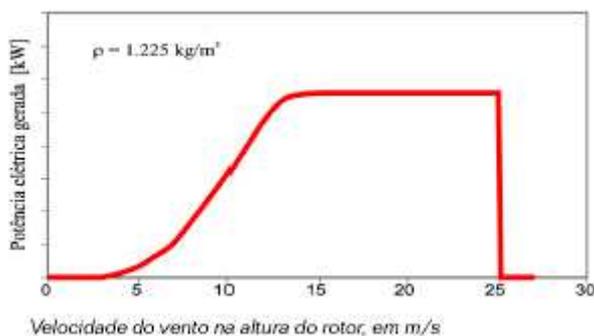


Figura 5 – Curva típica de potência de turbinas eólicas.
<9>.

Pela figura acima, é observado que, usualmente, a geração elétrica inicia-se com velocidades de vento da ordem de 2,5 - 3,0 m/s. Abaixo desses valores, o conteúdo energético do vento não justifica o aproveitamento. Velocidades superiores a aproximadamente de 12,0 m/s a 15,0 m/s ativam o sistema automático de limitação de potência da máquina, que pode ser por controle de ângulo de passo das pás ou por estol aerodinâmico, dependendo do modelo de turbina. Em ventos muito fortes, acima de 25m/s, no exemplo, atua o sistema automático de proteção.

Ventos muito fortes têm ocorrência rara e não são importantes em termos de aproveitamento além da turbulência associada ser indesejável para a estrutura da máquina. Nesse caso, a rotação das pás é reduzida e o sistema elétrico do gerador é desconectado da rede elétrica.

Turbinas eólicas de grande porte têm controle inteiramente automático, por meio de atuadores rápidos, software e microprocessadores alimentados por sensores duplos em todos os parâmetros relevantes. As curvas de potência fornecidas por fabricantes de turbinas, geralmente medidas por órgãos credenciados e independentes, usualmente referem-se a velocidades de vento quase instantâneas (médias de 10 minutos) e massa específica do ar $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ (15° C ao nível do mar).

2.4 A TURBINA EÓLICA

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos – eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono etc. Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não-flexível.

Entretanto, algumas características desse projeto ainda geram polêmica, como a utilização ou não do controle do ângulo de passo (pitch) das pás para limitar a potência máxima gerada. A tendência atual é a combinação das duas técnicas de controle de potência (stall e pitch) em pás que podem variar o ângulo de passo para ajustar a potência gerada, sem, contudo, utilizar esse mecanismo continuamente (WIND DIRECTIONS, 2000).

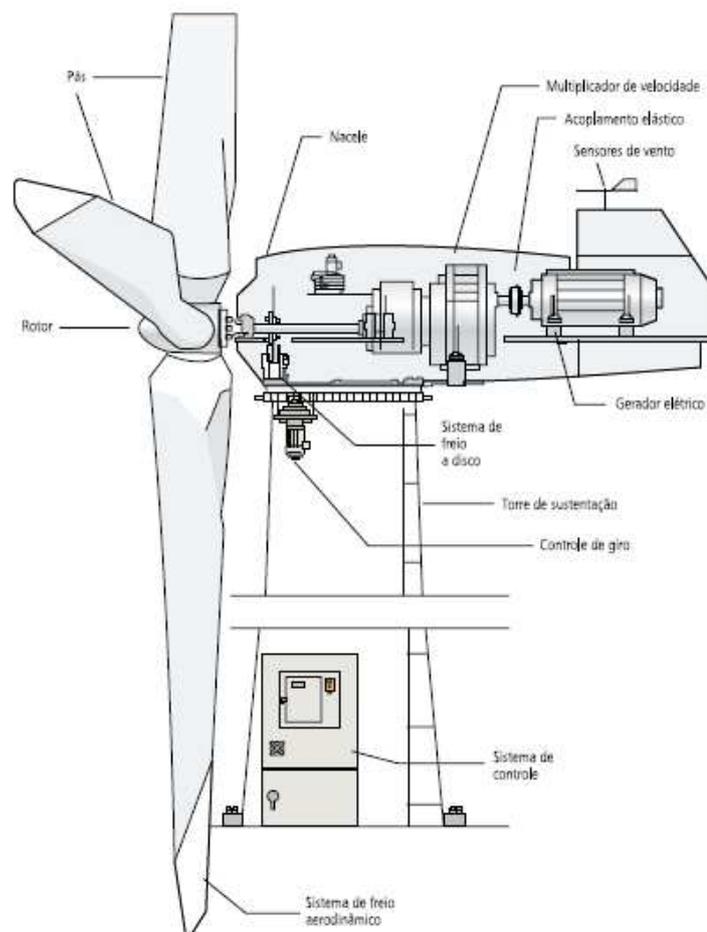


Figura 6 - Desenho esquemático de uma turbina eólica moderna.

<10>.

A primeira turbina eólica operada automaticamente para geração de energia elétrica foi construída por Charles Brush (1849-1929) em 1888. O diâmetro do seu rotor tinha 17 metros e possuía 144 pás de madeira. O gerador de 12 kW funcionou por 20 anos, carregando um sistema de baterias. O elevado número de pás fazia com que, mesmo sendo uma grande turbina, ela apresentava baixa velocidade e, conseqüentemente, menor capacidade do gerador.

Posteriormente, Poul la Cour (1846-1908) construiu seu próprio túnel de vento para experimentos, descobrindo que turbinas com menos pás, mais rápidas, são mais eficientes para a produção de eletricidade.

Na década de 1980 surgiu a máquina Darrieus, turbina eólica revolucionária de eixo vertical que usava flaps para controlar a potência e sistema de transmissão hidráulico.

Quanto à capacidade de geração elétrica, as primeiras turbinas eólicas desenvolvidas em escala comercial tinham potências nominais entre 10 kW e 50 kW. No início da década de 1990, a potência das máquinas aumentou para a faixa de 100 kW a 300 kW. Em 1995, a maioria dos fabricantes de grandes turbinas ofereciam modelos de 300 kW a 750 kW.

Em 1997, foram introduzidas comercialmente as turbinas eólicas de 1 MW e 1,5 MW, iniciando a geração de máquinas de grande porte. Em 1999 surgiram as primeiras turbinas eólicas de 2MW e hoje existem protótipos de 3,6MW e 4,5MW sendo testados na Espanha e Alemanha. A capacidade média das turbinas eólicas instaladas na Alemanha em 2002 foi de 1,4MW e na Espanha de 850kW. Atualmente, existem mais de mil turbinas eólicas com potência nominal superior a 1 MW em funcionamento no mundo (BOYLE, 1996; BTM, 2000; WINDPOWER, 2000; WIND FORCE, 2003).

Quanto ao porte, as turbinas eólicas podem ser classificadas da seguinte forma: pequenas – potência nominal menor que 500 kW; médias – potência nominal entre 500 kW e 1000 kW; e grandes – potência nominal maior que 1 MW.

Nos últimos anos, as maiores inovações tecnológicas foram a utilização de acionamento direto (sem multiplicador de velocidades), com geradores síncronos e novos sistemas de controle que permitem o funcionamento das turbinas em velocidade variável, com qualquer tipo de gerador. A tecnologia atual oferece uma variedade de máquinas, segundo a aplicação ou local de instalação.

Quanto à aplicação, as turbinas podem ser conectadas à rede elétrica ou destinadas ao suprimento de eletricidade a comunidades ou sistemas isolados. Em

relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme, que possui como exemplo a segunda representação da figura 7, ou *off-shore*, que está mostrada na terceira figura abaixo apresentada.

O maior parque eólico em mar aberto (*offshore*) do mundo está localizado na Dinamarca, o Middelgrunden. Ele possui 20 turbinas de 2 MW, num total de 40 MW.

As vantagens quanto à geração de energia eólica *offshore* podem ser relacionadas por:

- Menor turbulência do vento, possibilitando turbinas com menor carga de fadiga e maior eficiência;
- Menor altura das torres, pois o vento atua na camada superficial da água;
- Disponibilidade de grandes áreas abertas;
- Altas velocidades do vento, que geralmente aumenta com a distância da costa.

Como desvantagens, citamos:

- Limitação no acesso para manutenção e operação;
- Custo adicional para a integração com a rede elétrica;
- Custo adicional com relação às fundações marinhas.



Figura 7 – Turbinas Eólicas (pequena, média e grande porte).

Em se tratando de turbinas eólicas modernas, existem dois tipos básicos de rotores eólicos: os de eixo vertical e os de eixo horizontal. Os rotores diferem em seu custo relativo de produção, eficiência e na velocidade do vento em que tem sua maior eficiência.

As turbinas eólicas de eixo vertical (TEEVs) possuem rotores geralmente mais baratos que os de eixo horizontal, pois o gerador não gira seguindo a direção do vento, apenas o rotor gira enquanto o gerador fica fixo, contudo seu desempenho é inferior, tendo em vista que a elevação do rotor é menor e, conseqüentemente, apresenta menor velocidade do vento devido proximidade do solo. Apresentam como vantagem a facilidade de instalação e manutenção, haja vista que todos os equipamentos encontram-se no nível do solo.

As TEEVs podem ser usadas para turbinas de pequena escala e para o bombeamento de água em áreas rurais, mas todas as turbinas de escala de geração pública produzidas comercialmente são turbinas eólicas de eixo horizontal (TEEHs).

Sobre esses rotores de eixo vertical, mostremos seus dois tipos:

- **Rotor Savonius:** é um dos mais simples. Movido principalmente pela força de arrasto do ar, sua maior eficiência se dá em ventos fracos e pode chegar a 20%.

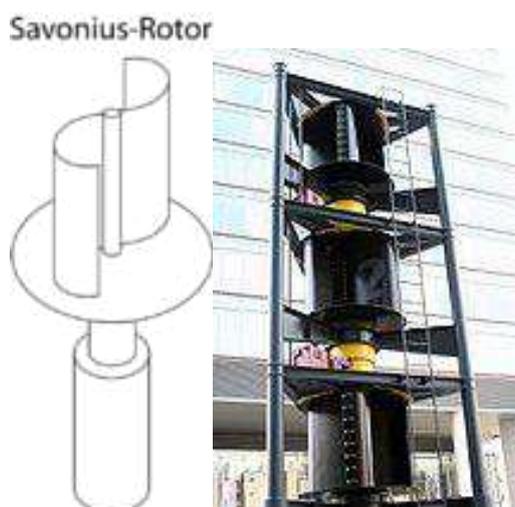


Figura 8 – Representação de um rotor tipo Savonius. <11>.

- **Rotor Darrieus:** O rotor do tipo Darrieus é constituído por 2 ou 3 pás (como as dos helicópteros), funciona através de força de sustentação tendo assim uma eficiência melhor que a do rotor Savonius, podendo chegar a 40% em ventos fortes.

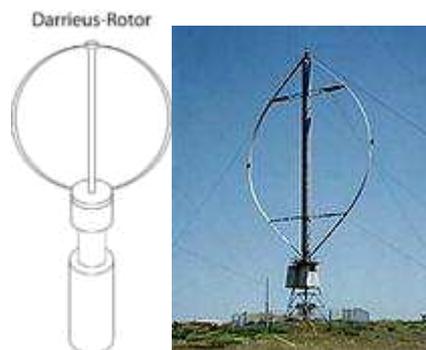


Figura 9 – Representação do rotor tipo Darrieus. <11>.

Já os rotores de eixo horizontal, são os mais conhecidos e os mais utilizados por possuir maior eficiência, compensando o seu custo maior.

O eixo da TEEH é montado horizontalmente, paralelo ao solo. As TEEHs precisam se alinhar constantemente com o vento, usando um mecanismo de ajuste. O sistema de ajuste padrão consiste de motores elétricos e caixas de engrenagens que movem todo o rotor para a esquerda ou direita em pequenos incrementos. O controlador eletrônico da turbina lê a posição de um dispositivo cata-vento (mecânico ou eletrônico) e ajusta a posição do rotor para capturar o máximo de energia eólica disponível. As TEEHs usam uma torre para elevar os componentes da turbina a uma altura ideal para a velocidade do vento (e para que as pás possam ficar longe do solo) e ocupam muito pouco espaço no solo, já que todos os componentes estão a até 80 metros de altura.

Os rotores Multipás são mais utilizados para bombeamento de água de poços artesanais, mas nada impede que sejam utilizados para geração de energia elétrica. Impulsionados tanto por força de arrasto como por força de sustentação, esses rotores têm seu pico de eficiência em ventos fracos, com uma eficiência de 30%.



Figura 10 – Rotor de eixo horizontal com múltipás.<5>.

Já os rotores tripás são os mais utilizados para geração de energia elétrica em larga escala são utilizadas como fonte de energia renovável, são impulsionados apenas pela força de sustentação. Apesar dos rotores com 2 pás serem mais eficientes, são mais instáveis e propensos a turbulências, trazendo risco a sua estrutura, o que não acontece nos rotores de 3 pás que são muito mais estáveis, barateando seu custo e possibilitando a construção de aerogeradores de mais de 100 metros de altura e com capacidade de geração de energia que pode chegar a 5 MW (megawatts). Seu pico de geração de energia é atingido com ventos fortes e sua eficiência pode passar dos 45%.



Figura 11 – Rotor de eixo horizontal com tripás. <5>.

2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS

Os impactos negativos relacionados com a utilização da energia eólica que podem ser destacados são a poluição sonora, visual e a colisão de pássaros.

A poluição sonora é causada pelo ruído produzido pelos geradores eólicos que aumentam proporcionalmente com a velocidade do vento. Com o avanço da tecnologia empregada, as turbinas modernas produzem bem menos ruído do que as turbinas convencionais.

Os impactos visuais são decorrentes do agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso de centrais eólicas com um número considerável de turbinas. Em algumas áreas há conflitos entre a preservação da paisagem natural e instalação de sistemas eólicos. Apesar de serem considerados como negativos, esses parques podem se integrar de tal modo ao meio ambiente virando até atração turística, gerando renda e promovendo o desenvolvimento regional.

Sobre a colisão de pássaros, o impacto dos sistemas eólicos sobre a população local de pássaros preocupa os ecologistas, porém pesquisas realizadas em diversos países mostram que o número de mortes de pássaros devido à colisão com as turbinas é bem menor que o número de mortes causado pelas linhas de alta tensão.

2.6 A PERSPECTIVA DE FUTURO DA ENERGIA EÓLICA

Com a crise energética, a alternativa de utilização da energia eólica cresce cada vez mais, nos panoramas energéticos e no cenário mundial, conforme pode ser verificado na figura apresentada abaixo, onde é apresentada a informação sobre a tendência do crescimento estimada até o ano de 2020, fazendo com que a energia eólica dê um salto de 160 GW em 2009 para 1900 GW em 2020 (WWEA), representando um aumento de 12% ao ano em todo o planeta, reduzindo a emissão de dióxido de carbono em mais de 10 bilhões de toneladas.

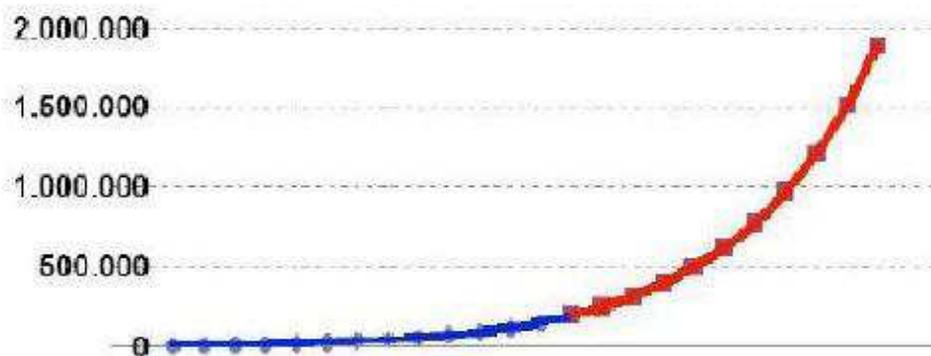


Figura 12 - Tendência do crescimento eólico até 2020. <12>.

No Brasil, o ano de 2011 foi marcado pela consolidação da inserção da energia eólica na matriz energética brasileira, além de se firmar definitivamente como a segunda fonte mais competitiva do país, atingindo o patamar médio de preços de R\$ 100,00/MWh. O montante referente à contratação nos leilões ocorridos neste ano, de 2.905 MW no total, foi muito superior aos 2 GW esperados, o que mantém de forma sustentável sua cadeia produtiva.

Tendo uma trajetória virtuosa com o início do Programa de Fontes Alternativas (PROINFA), lançado em 2004 e baseado em um estruturado modelo de financiamentos e políticas regionais, esse programa foi responsável pela contratação de 1.422,9 MW, por meio de preços subsidiados.

A trajetória tecnológica, principal fator de competitividade desta indústria, o aumento na altura dos aerogeradores, de 50 metros para 100 metros, o diâmetro das pás e dos rotores, somados a especificidades dos ventos brasileiros, permitem uma vantagem comparativa única. Destaque para o fator de capacidade no Brasil, da ordem de 45%, enquanto que nos demais países esse número gira em torno de 30 a 35%.

Considerando a conjuntura de crise internacional, o Brasil tem sido o único locus de investimento para este setor, uma vez que Europa e EUA reduziram e, em alguns casos, cortaram seus investimentos em fontes renováveis subsidiadas. Esses fatores fazem com que a competição se torne ainda mais acirrada, de forma que os investidores, para ganhar mercado, tendem a aceitar uma remuneração menor para entrar no Brasil. Considerando que as características dos ventos brasileiros são muito favoráveis ao bom desempenho dos parques, o modelo de leilão, as condições de financiamentos e a garantia de um contrato de 20 anos permitem uma remuneração

razoável para sustentar os projetos.

A energia eólica tem experimentado um exponencial e virtuoso crescimento no Brasil. O Primeiro Leilão de Energia Eólica, realizado em 2009, firmou o potencial da tecnologia de geração eólica na matriz elétrica nacional, e mostrou a sua competitividade. Daí em diante, houve maior eficiência dos projetos, com uma cadeia de suprimentos desenvolvida. De 2009 a 2011, nos seis leilões onde a fonte eólica participou, foram contratados 6,8 GW em novos projetos. Tais projetos elevaram o volume de instalações de energia eólica no País para mais de 8,2 GW até 2016, 5,5 vezes maior do que a capacidade atual, e atrairá mais de 20 bilhões de dólares em investimentos.

Em termos de indústria, até meados de 2008 havia uma única empresa fabricante de aerogeradores no Brasil. Hoje são oito fábricas de aerogeradores em operação, duas em construção, e ainda outras fábricas planejadas ou em estudo. Atualmente, existem treze empresas fabricantes de aerogeradores atuando no mercado nacional. Soma-se ao setor seis fábricas de torres eólicas em operação, uma em construção e a segunda maior fabricante de pás eólicas do mundo, a Tecsís, empresa totalmente brasileira. O potencial eólico brasileiro é estimado em 300 GW, possuindo alta relevância face à necessidade de aumento da capacidade instalada nacional. O país contrata, por ano, cerca de 6 GW de potência nos leilões de energia nova e o potencial eólico disponível deve ser explorado para atender esta demanda.

O Brasil é destaque com geração de energia elétrica limpa e renovável, preponderantemente, hídrica, onde a eólica é complementar. Quarenta e cinco por cento da matriz energética provêm de fontes que não emitem CO₂, contra menos de 20% da média mundial. Adicionalmente, o país dispõe de diversas opções de geração de energia limpa e competitiva para sua expansão, incluindo a hidroeletricidade, a cogeração, a biomassa e a energia eólica.

Os próximos anos serão fundamentais para a sustentabilidade do setor, consolidando a indústria e assegurando o domínio tecnológico desta fonte de geração de energia. O crescimento da indústria de energia eólica brasileira traz também muitos desafios associados, como a logística do transporte interno de equipamentos e de transmissão, a escassez de mão de obra e aspectos ambientais.

Assim, a energia eólica é a fonte de geração de energia elétrica que mais cresce no Brasil. O potencial eólico brasileiro é estimado em 300GW e a expectativa

do setor elétrico brasileiro é de contratar pelo menos 2,0 GW por ano até 2020.

Tudo o que está supracitado, pode ser ratificado pela projeção da evolução de potência instalada no Brasil, conforme mostrado pelo gráfico apresentado abaixo.



Figura 13 - Projeção da evolução de potência instalada no Brasil. <11>.

3 O PANORAMA DA ENERGIA EÓLICA

3.1 CAPACIDADE INSTALADA NO MUNDO

O desenvolvimento apresentado nas últimas décadas pela tecnologia de conversão de energia eólica é significativo. Os sistemas eólicos estabeleceram-se nos EUA e na Europa por intermédio de uma indústria sólida e evoluíram no projeto, na construção e na operação, o que resultou numa redução dos custos.

A popularidade do uso da energia eólica sempre flutuou com o preço de combustíveis fósseis. Quando os preços do combustível caíram depois de Segunda Guerra Mundial, o interesse pela energia eólica diminuiu. Mas no início da década de 70, com a crise mundial do petróleo, houve novamente um grande interesse de países europeus e dos Estados Unidos em desenvolver equipamentos para produção de eletricidade que ajudassem a diminuir a dependência do petróleo e carvão. Mais de 50.000 novos empregos foram criados e uma sólida indústria de componentes e, equipamentos foram desenvolvidos.

Em 1990, a capacidade instalada no mundo era inferior a 2.000 MW. Em 1994, ela subiu para 3.734 MW, divididos entre Europa (45,1%), América (48,4%), Ásia (6,4%) e outros países (1,1%). Quatro anos mais tarde, chegou a 10.000 MW e no final de 2002 a capacidade total instalada no mundo ultrapassou 32.000 MW. O mercado tem crescido substancialmente nos últimos anos, principalmente na Alemanha, EUA, Dinamarca e Espanha, onde a potência adicionada anualmente supera 3.000 MW. O total da potência instalada no mundo cresceu, desde 1992, de 2500 MW para mais de 40.000 MW em 2004 (taxa de crescimento anual de 30%).

Esse crescimento de mercado fez com que a Associação Européia de Energia Eólica estabelecesse novas metas, indicando que, até 2020, a energia eólica poderá suprir 10% de toda a energia elétrica requerida no mundo. De fato, em alguns países e regiões, a energia eólica já representa uma parcela considerável da eletricidade produzida. Na Dinamarca, por exemplo, a energia eólica representa 18% de toda a eletricidade gerada e a meta é aumentar essa parcela para 50% até 2030. Na região de Schleswig-Holstein, na Alemanha, cerca de 25% do parque de energia elétrica

instalado é de origem eólica. Na região de Navarra, na Espanha, essa parcela é de 23%. Em termos de capacidade instalada, estima-se que, até 2020, a Europa já terá 100.000 MW.

Com uma capacidade adicional instalada de 44.184 MW, a produção mundial de energia eólica no ano passado foi impulsionada principalmente pelos Estados Unidos, que estabeleceram um recorde em novas instalações, somando 14.059 MW.

A Europa manteve sua forte participação no mercado global, enquanto que na Ásia houve um pequeno recuo, com expectativa de recuperação em 2013. Os dados constam do *Baromètre Éolien 2012*, publicado pela Eurobserv'ER.

Com 11.840 MW instalados em 2012, a Europa é a região que tem a maior capacidade eólica, com 38,9% do total, seguida pela Ásia, com 34,8% (China com 77%), América do Norte, com 23,6% (EUA com 90%), América Latina, com 1,2% (Brasil com 53%), Região do Pacífico (1,1%) e África e Oriente Médio (0,4%).

O Conselho Mundial de Energia Eólica (GWEC, na sigla em inglês), projeta para 2016 uma potência eólica global acumulada de 493 GW, ou seja, um avanço de 75% em relação ao instalado atualmente.

Alguns dados sobre a situação atual e perspectivas da energia eólica em países de diferentes continentes são apresentados a seguir, começando pela Europa. As cinco maiores capacidades instaladas no mar são: Reino Unido (2.679 MW), Dinamarca (922 MW), Bélgica (380 MW), Alemanha (280 MW) e Holanda (228).

No final de 2012, o parque eólico *offshore* da Bélgica (no Mar do Norte) teve um aumento espetacular de sua potência instalada, em relação a 2011: 94%. A Holanda fixou uma meta para que até 2020 a participação de fontes renováveis em sua matriz energética seja de 14%, com 30% de energia eólica *offshore*, ou 6.000 MW instalados no mar.

Como parte de um plano nacional para aumentar a participação de energias renováveis em sua matriz elétrica, o Japão planeja construir até 2020 um parque eólico flutuante com capacidade total de 1.001 MW, que será instalado ao longo da costa de Fukushima.

Desde 2010, a China é o maior produtor de energia eólica. Em 2011 o total instalada nesse país ultrapassava os 62.000MW (62GW), comparado com os 44.000 instalado até 2010, foi um aumento de 41%.

Em alguns países, a energia elétrica gerada a partir do vento representa significativa parcela da demanda. Na Dinamarca esta representa 23% da produção, 6% na Alemanha e cerca de 8% em Portugal e na Espanha (dados de setembro de 2007). Globalmente, a energia eólica não ultrapassa o 1% do total gerado por todas as fontes.

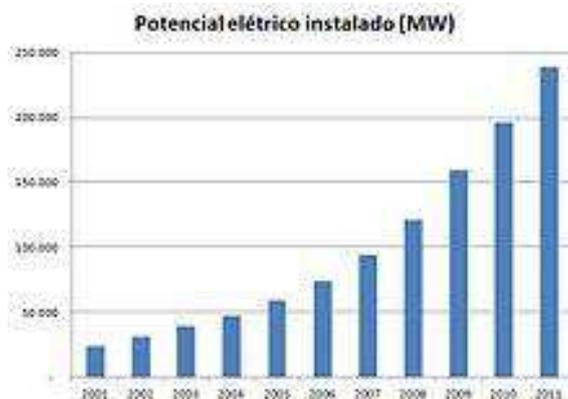


Figura 14 - Evolução do potencial de energia eólica instalado no mundo de 2001 a 2011.
<12>.

3.2 O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

Abordando sobre a aplicação desse tipo de energia no Brasil, pode-se dizer que as grandes centrais eólicas podem ser conectadas à rede elétrica uma vez que possuem um grande potencial para atender o Sistema Interligado Nacional (SIN). As pequenas centrais, por sua vez, são destinadas ao suprimento de eletricidade a comunidades ou sistemas isolados, contribuindo para o processo de universalização do atendimento de energia. Em relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme (*on-shore*) ou no mar (*off-shore*).

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), o Brasil possui 248 megawatts (MW) de capacidade instalada de energia eólica, derivados de dezesseis empreendimentos em operação. O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel), mostra um potencial bruto de 143,5 GW, o que torna a energia eólica uma alternativa importante para a diversificação do "mix" de geração de eletricidade no País. O

maior potencial foi identificado na região litoral do Nordeste e no Sul e Sudeste. O potencial de energia anual para o Nordeste é de cerca de 144,29 TWh/ano; para a região Sudeste, de 54,93 TWh/ano; e, para a região Sul, de 41,11 TWh/ano.

Ainda que a principal referência de potencial eólico do Brasil, o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (Amarante et al., 2001), não apresente avaliações a respeito da potencialidade energética dos ventos na plataforma continental do vasto litoral brasileiro - que tem nada menos que 7.367 km de extensão e conta com avançado desenvolvimento em tecnologias offshore em função do desenvolvimento e capacitação para a prospecção e produção de petróleo e gás natural neste ambiente - esta alternativa não pode ser ignorada e esta via deve ser ainda cuidadosamente avaliada, tendo em vista que estes projetos apresentam um maior volume específico de energia elétrica gerada ao beneficiarem-se da constância dos regimes de vento no oceano.

As aplicações mais favoráveis desta fonte energética no Brasil estão na integração ao sistema interligado de grandes blocos de geração nos sítios de maior potencial. Em certas regiões, como por exemplo, a região Nordeste, no vale do Rio São Francisco, pode ser observada uma situação de conveniente complementariedade da geração eólica com o regime hídrico, seja no período estacional ou na geração de ponta do sistema - ou seja, o perfil de ventos observado no período seco do sistema elétrico brasileiro mostra maior capacidade de geração de eletricidade justamente no momento em que a afluência hidrológica nos reservatórios hidrelétricos se reduz. Por outro lado, no período úmido do sistema elétrico brasileiro, caracterizado pelo maior enchimento destes reservatórios, o potencial de geração eólica de eletricidade se mostra menor.

Assim, a energia eólica se apresenta como uma interessante alternativa de complementariedade no sistema elétrico nacional, como veremos posteriormente em nosso estudo de caso.

Embora se insira dentro do contexto mundial de incentivo por tecnologias de geração elétrica menos agressivas ao meio ambiente, como qualquer outra tecnologia de geração de energia, a utilização dos ventos para a produção de

energia elétrica também acarreta em alguns impactos negativos - como interferências eletromagnéticas, impacto visual, ruído, ou danos à fauna, por exemplo. Atualmente, essas ocorrências já podem ser minimizadas e até mesmo eliminadas por meio de planejamento adequado, treinamento e capacitação de técnicos, e emprego de inovações tecnológicas.

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. De qualquer forma, os diversos levantamentos e estudos realizados e em andamento têm dado suporte e motivado a exploração comercial da energia eólica no país. Os primeiros estudos foram feitos na região Nordeste, principalmente no Ceará e em Pernambuco.

Com o apoio da ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT, o Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE, da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, publicou em 1998 a primeira versão do Atlas Eólico da Região Nordeste. A continuidade desse trabalho resultou no Panorama do Potencial Eólico no Brasil, conforme figura 15.

Os recursos apresentados na legenda da Figura 15 referem-se à velocidade média do vento e energia eólica média a uma altura de 50m acima da superfície para 5 condições topográficas distintas: zona costeira – áreas de praia, normalmente com larga faixa de areia, onde o vento incide predominantemente do sentido mar-terra; campo aberto – áreas planas de pastagens, plantações e /ou vegetação baixa sem muitas árvores altas; mata – áreas de vegetação nativa com arbustos e árvores altas mas de baixa densidade, tipo de terreno que causa mais obstruções ao fluxo de vento; morro – áreas de relevo levemente ondulado, relativamente complexo, com pouca vegetação ou pasto; montanha – áreas de relevo complexo, com altas montanhas.

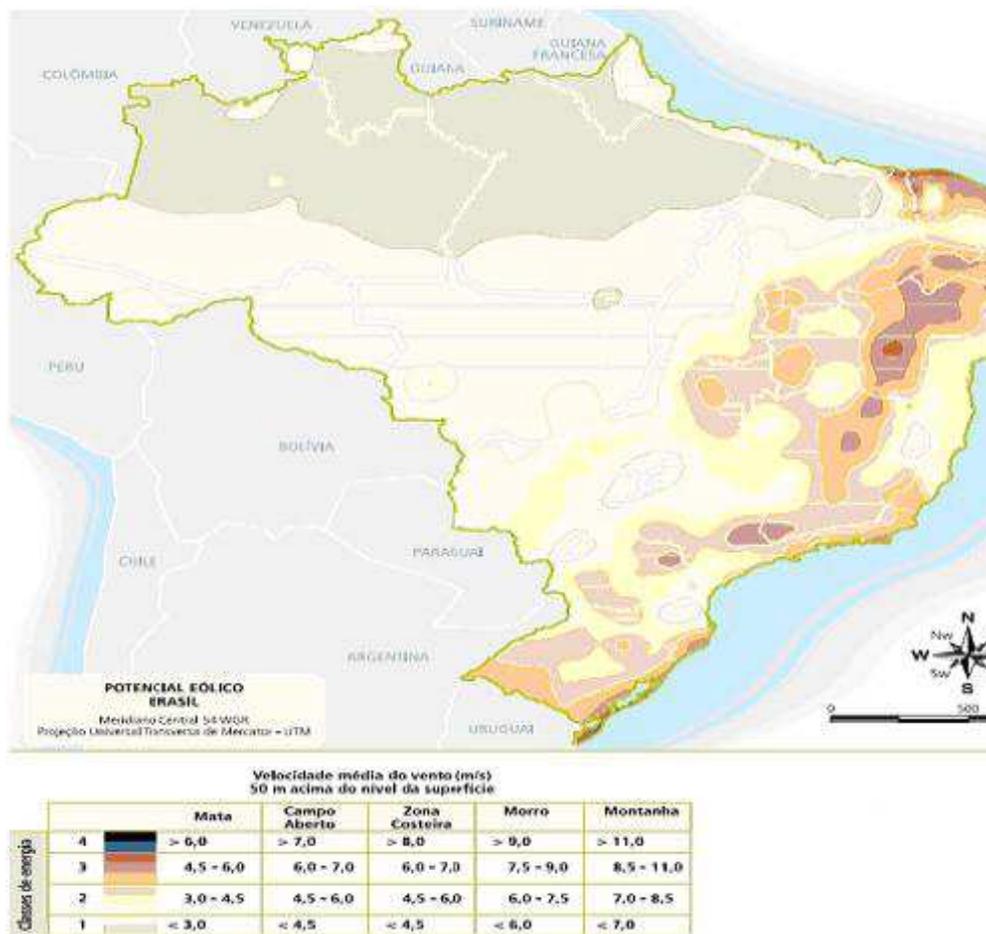


Figura 15 - Velocidade média anual do vento a 50 metros de altura. <7>.

Ainda na legenda, a classe 1 representa regiões de baixo potencial eólico, de pouco ou nenhum interesse para o aproveitamento da energia eólica.

A classe 4 corresponde aos melhores locais para aproveitamento dos ventos no Brasil. As classes 2 e 3 podem ou não ser favoráveis, dependendo das condições topográficas. Por exemplo: um local de classe 3 na costa do Nordeste (zona costeira) pode apresentar velocidades médias anuais entre 6,5 e 8 m/s, enquanto que um local de classe 3 no interior do Maranhão (mata) apresentará apenas valores entre 4,5 e 6 m/s.

4 O ESTADO DA ARTE

O estado da arte é o nível mais alto de desenvolvimento, indicando o ponto em que o produto em questão deixa de ser um projeto técnico para se tornar uma obra-prima.

Neste tópico, será mostrado a aplicabilidade e modelos inovadores de sustentabilidade da energia eólica.

4.1 POSTE DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA ALIMENTADO POR ENERGIA EÓLICA E SOLAR

Ele se chama Produtor Independente de Energia (PIE) e mede entre 12 e 18 metros de altura (feitos em aço). No mesmo, há a presença de um avião, que é feito de fibra de carbono e alumínio especial localizado em seu topo. A peça tem três metros de comprimento e é a peça-chave do poste híbrido. Esse poste, 100% alimentado por energias eólica e solar, foi desenvolvido pelo cearense Fernandes Ximenes, engenheiro mecânico e dono da Gram-Eollic. Ximenes diz que a escolha do formato de avião se deve à sua aerodinâmica, que facilita a captura de raios solares e de vento. As asas do avião abrigam células solares que captam raios ultravioletas e infravermelhos por meio do silício (elemento químico que é o principal componente do vidro, cimento, cerâmica, da maioria dos componentes semicondutores e dos silicões), transformando-os em energia elétrica (até 400 watts), que é armazenada em uma bateria afixada alguns metros abaixo.

Assim como as pás dos grandes cata-ventos espalhados pelo litoral cearense, a energia (até 1.000 watts) é gerada a partir do giro das hélices do avião. As tecnologias limpas – aquelas que não queimam combustível fóssil – são o futuro do planeta quando o assunto é geração de energia elétrica. E, nessa onda, a produção eólica e solar sai na frente, representando importantes fatias na matriz energética de vários países europeus, como Espanha, Alemanha e Portugal, além dos Estados Unidos. Cada poste é capaz de abastecer outros três ao mesmo tempo. Ou seja, um poste com um “avião” é capaz de produzir energia para outros

dois sem gerador e com seis lâmpadas LEDs (mais eficientes e mais ecológicas, uma vez que não utilizam mercúrio, como as fluorescentes compactas) de 50.000 horas de vida útil dia e noite (cerca de 50 vezes mais que as lâmpadas em operação atualmente. Quanto à luminosidade, as LEDs são oito vezes mais potentes que as convencionais).

O poste tem autonomia de até sete dias. Segundo Ximenes, “as baterias do poste híbrido têm autonomia para 70 horas, ou seja, se faltarem vento e sol durante 470 horas, ou sete noites seguidas, as lâmpadas continuarão ligadas. O inventor explica que a ideia nasceu em 2001, durante o apagão. Ele conta que a caminhada foi difícil, em função da falta de incentivo – durante sete anos o trabalho foi desenvolvido com recursos próprios, até conseguir o apoio do governo do estado -. Ximenes não revela o valor necessário à instalação do equipamento, mas garante que é cerca de 10% menor que o convencional, pois economiza transmissão, subestação e cabeamento. A economia é de cerca de R\$ 21.000 por quilômetro/mês.



Figura 16 - Esquema do poste de iluminação pública alimentado por energia eólica e solar. <2>.

4.2 EDIFÍCIOS AUTO-SUFICIENTES EM ENERGIA

Os Emirados Árabes Unidos vem construindo nos últimos anos verdadeiras artes da Engenharia e Arquitetura, como exemplo pode ser citado o centro de comércio “Bahrain World Trade Center”. O complexo constituído por duas torres idênticas, que se erguem 240 metros acima do solo, sustentam 3 turbinas gigantes. Os edifícios oferecem uma silhueta visualmente golpeante, apropriada para o ambiente marítimo desta pequena ilha do médio oriente, conforme está ilustrado na figura abaixo:



Figura 17 - Vista noturna do complexo Bahrain World Trade Center. <2>.

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

Segundo a Atkins, o custo de até 30% do valor do projeto tornaria inviável a integração de turbinas de larga escala, tanto por conta da adaptação do projeto do prédio quanto das pesquisas de turbinas especiais. A solução foi usar turbinas convencionais sustentadas cada uma por um eixo horizontal de 50 toneladas. No entanto, o potencial da região aliado à criatividade da empresa fez com que sua incorporação custasse menos de 3% do projeto. A solução não foi a ideal, melhor

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

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

5 ENERGIA EÓLICA COMO FONTE COMPLEMENTAR À HIDRELETRICIDADE

Com o predomínio da geração hidrelétrica no Brasil, a estabilização sazonal da oferta de energia tem sido um desafio histórico ao planejamento da operação dos sistemas interligados, tendo em vista que os regimes hidrológicos apresentam flutuações sazonais com notável modificação de amplitude.

Por outro lado, na última década, o aproveitamento eólico-elétrico mundial demonstrou aptidão às escalas de gigawatts, necessárias a uma contribuição efetiva aos sistemas elétricos.

Este tópico do trabalho mostrará, a partir de dados existentes, a viabilidade de estabilização sazonal da oferta de energia através da complementaridade entre os regimes eólico e hidrológico, se forem aproveitados os amplos recursos naturais disponíveis no país. Neste é apresentada experiências internacionais realizadas anteriormente e terá como foco principal o estudo de caso da região Nordeste do Brasil, bem como um comparativo desta com as regiões Sul/Sudeste, que ratificam a contribuição apresentada da energia eólica ao sistema elétrico brasileiro.

5.1 EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS EM INTERAÇÃO HIDRO/EÓLICA

Nos anos de 1997 e 1998 foi realizado um estudo na Universidade de Roskilde na Dinamarca, com contribuições de concessionárias de energia e transmissão da Dinamarca, Suécia e Noruega com simulações em resolução horária para dois cenários de inserção de energia eólica no sistema dinamarquês, interligado ao sistema elétrico europeu.

Em um primeiro momento foi feito uma inserção eólica de 37% em consumo, o que corresponde a 54% da demanda na Dinamarca, encontrando complementaridade no sistema hidráulico da Suécia e Noruega. Assim, foi observado que essa oferta de energia nos meses "secos" daqueles países não acarretou em prejuízo aos níveis de segurança na estabilidade de fornecimento

regional.

No segundo momento do estudo, foi analisada uma inserção eólica próxima a 100% do consumo no sistema elétrico dinamarquês, interligado ao sistema elétrico nórdico, incluindo Alemanha, Finlândia e Holanda. Segundo as simulações, este cenário seria tecnicamente viável, sem prejuízos aos níveis de segurança do fornecimento regional, desde que realizados investimentos suplementares em reforço ao sistema de transmissão Dinamarca/Suécia.

5.2 ESTUDO DE CASO: COMPLEMENTARIDADE SAZONAL HIDRO-EÓLICA NA REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

O Sistema Elétrico Brasileiro é formado pela interligação de grandes subsistemas: Sul-Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste. As regiões Sudeste e Nordeste tem anualmente um período chuvoso em que a disponibilidade de energia elétrica de origem hídrica é maior e outro seco em que essa disponibilidade cai bastante, sobretudo na região Nordeste.

Com respeito à disponibilidade de energia eólica, no Nordeste ela é comercialmente atrativa sendo, portanto, uma boa alternativa para complementar o déficit de energia de origem hídrica, pois não possui esta característica de sazonalidade. Com relação ao Sistema Sul-Sudeste, também se pode perceber esta característica de complementaridade, porém os valores não são tão significativos como na Região Nordeste.

As usinas hidrelétricas correspondem a mais de 70% da capacidade instalada para a geração de energia elétrica no sistema elétrico brasileiro que é caracterizado por grandes usinas com potência instalada superior a 250 MW.

Com relação à localização geográfica, a maioria das usinas hidrelétricas do Brasil está situada nas bacias hidrográficas com nascentes nas montanhas das regiões Sudeste e Sul. Este fato leva a crer que a maioria da geração de energia elétrica do Brasil depende dos regimes hidrológicos destas regiões.

Estudos elaborados em concessionárias de energia do Nordeste e do Sul do Brasil mostraram que as usinas hidrelétricas do Sudeste e do Nordeste têm regimes hidrológicos sazonais semelhantes: maiores vazões naturais dos rios durante o

período verão-outono (dezembro a abril), enquanto que algumas vezes foram verificados níveis críticos dos reservatórios durante o período de inverno-primavera (maio a novembro). Este fato tem se tornado um desafio permanente para o planejamento da operação do sistema interligado brasileiro e também tem influenciado as tarifas dos grandes consumidores industriais no país. Além disso, os regimes eólicos do Sul e do Nordeste são complementares ao regime hidrológico sazonal que pode trazer possíveis benefícios de uma maior participação da energia eólica na geração de energia elétrica no Brasil.

A CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco, realizou simulações de UEEs (Usina Elétrica Eólica) com uma potência eólica instalada de 3 GW, referentes a 5 locais da costa do estado do Ceará durante o período de 1993-1995. Nesta hipótese, as usinas eólicas seriam instaladas em 10% do litoral do estado do Ceará, contariam com aerogeradores da classe de 500-600 kW, eficiência da usina de 90% e disponibilidade dos aerogeradores de 95%. A geração mensal acumulada resultante (Figura 18) apresentou uma forte sazonalidade.

A Figura 19 também apresenta o comportamento anual da vazão média mensal afluente no reservatório de Sobradinho relativo ao período de 1931-1992.

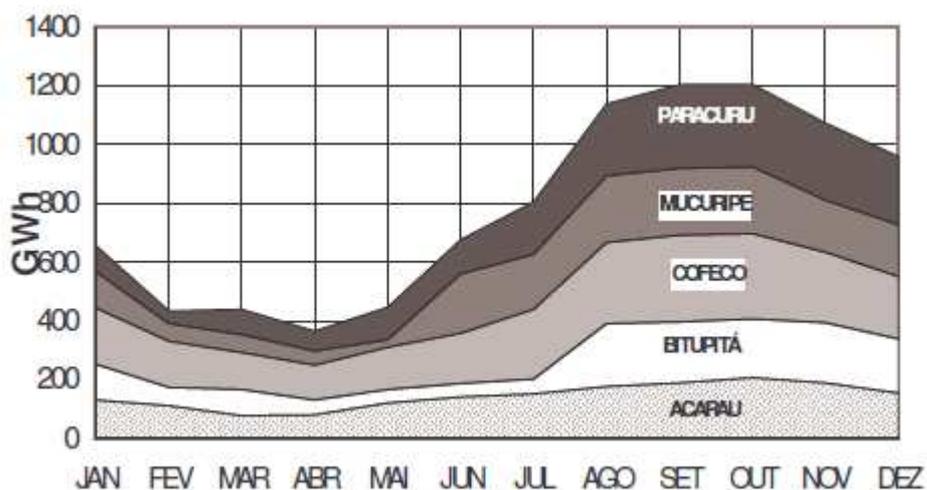


Figura 18 – Complementaridade hidro-eólica no Sistema Nordeste. <13>.

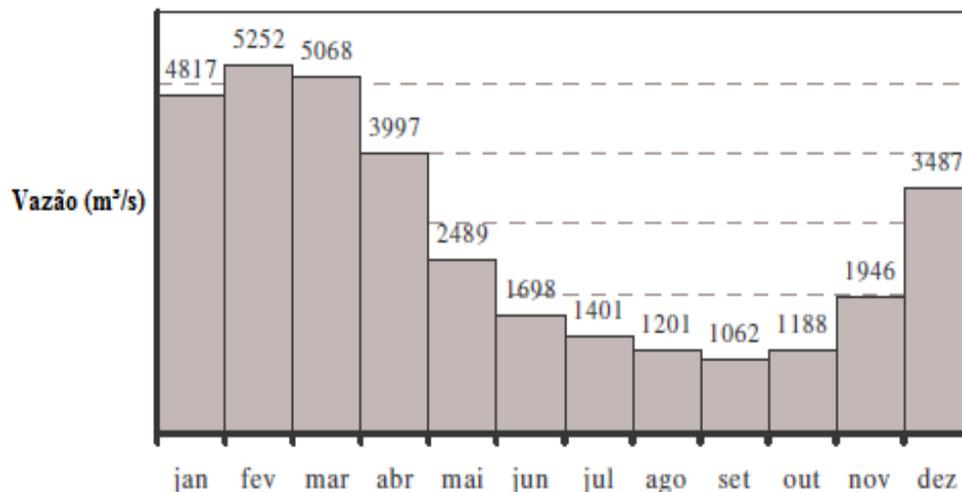


Figura 19 - Vazão Afluente no Reservatório de Sobradinho, 1931/1992. <13>.

Os estudos avaliaram o aumento da regularização dos reservatórios de todas as usinas hidrelétricas da CHESF no Rio São Francisco (capacidade instalada de 9.974 MW), em diversos cenários (baseados nos dados anemométricos do estado do Ceará) de participação da energia eólica e respectivas economias de água. O acréscimo hipotético de vazão (ou água poupada) devido à inserção de energia eólica de 14%, 30% e 60% da capacidade instalada.

A Figura 20 mostra a normalização da energia eólica e da energia hidráulica natural, ou seja, a relação entre os valores médios mensais e as médias anuais dos dois regimes, onde se pode observar sistemas complementares com contribuição positiva da fonte eólica para o sistema elétrico em sua maior parte alimentado por hidrogeradores, principalmente durante o período seco do rio São Francisco, e com o pico máximo dos recursos eólicos no mês de setembro. Conforme pode ser observado, o perfil da vazão do rio se altera à medida em que passa a haver um aumento da participação eólica, especialmente por um acréscimo maior do volume no período seco do rio.

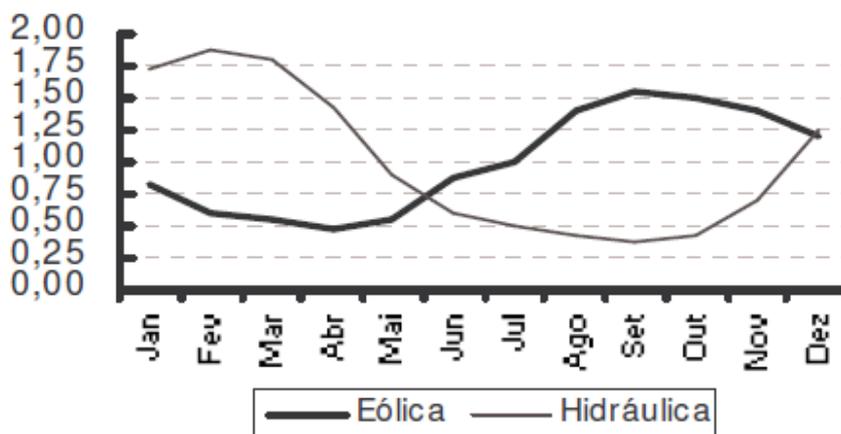


Figura 20 - Regimes sazonais das energias eólica e hidráulica. <13>.

De toda a contribuição que a energia eólica possa dar para possibilitar o aumento do volume em Sobradinho, mediante a substituição parcial da geração hidráulica por eólica, a que mais interessa é a que ocorre durante o período seco do rio São Francisco, ou seja, de maio a outubro. Dessa forma, na Tabela 1, ilustrou-se o volume de água equivalente, correspondente à produção de energia gerada a partir do aproveitamento dos ventos. A primeira coluna mostra a potência elétrica média anual, a partir de fontes eólicas, necessária para um equivalente incremento percentual teórico na vazão média natural do rio, em Sobradinho, como pode ser visto na segunda coluna. A terceira coluna traz o correspondente volume hipotético possível de ser acumulado durante o período seco (maio a outubro). Finalmente, a quarta coluna apresenta a potência elétrica média no período úmido produzida por parques eólicos.

MWh/h anual	Contribuição eólica (%)	Bilhões m ³ , período seco	MWh/h período úmido
1090.0	14,3	7,4	921.4
2286.7	30,0	15,5	1933.0
4573.4	60,0	31,0	3866.0

Tabela 1 - Aproveitamento nos períodos secos e úmidos.

Apesar do mês de novembro ser considerado o início do período úmido, energeticamente é considerado crítico, por coincidir historicamente com os menores volumes do reservatório de Sobradinho, a exemplo dos 10,92% e 11,33% do volume útil de 28,6 bilhões de metros cúbicos, atingidos em novembro, respectivamente nos anos de 1987 e 1999. Portanto, é possível obter, de forma semelhante, os benefícios oriundos da produção da energia eólica, ainda intensa durante esse mês.

Como se pode observar, a regularização da vazão do rio São Francisco pode receber uma grande colaboração, de forma natural, do aproveitamento eólico. Essa contribuição pode ocorrer não só a partir dos ventos do Ceará, mas também de outros estados do Norte e Nordeste, onde o maior potencial acontece no segundo semestre do ano por grande influência dos ventos alísios.

O Nordeste do Brasil é conhecido pelos fortes ventos ao longo de toda a sua costa. Ressalta-se também a ocorrência de dunas de areias nesta faixa: as dunas próximas ao mar apresentam uma das mais baixas rugosidades ao deslocamento do vento, superior apenas àquela no mar (*offshore*). O estado do Ceará, por exemplo, tem mais de 400 km² de dunas em seu litoral.

Os estudos da CHESF (Figura 21) demonstram que a operação integrada de usinas eólicas e hidrelétricas pode adicionar uma estabilidade sazonal ao sistema, através do aumento do fator de capacidade das usinas hidrelétricas existentes. A água poupada na geração de energia elétrica pode ser destinada a outros usos uma vez que a região Nordeste sofre frequentes períodos de secas; e ocorrem conflitos do uso da água do São Francisco, envolvendo principalmente a irrigação de lavouras.

A energia eólica poderá também resolver o grande dilema do uso da água do Rio São Francisco no Nordeste (água para gerar eletricidade versus água para irrigação). Grandes projetos de irrigação às margens do rio e/ou envolvendo a transposição das águas do rio para outras áreas podem causar um grande impacto no volume de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas e, conseqüentemente, prejudicar o fornecimento de energia para a região. Entretanto, observando o gráfico abaixo, percebe-se que as maiores velocidades de vento no nordeste do Brasil ocorrem justamente quando o fluxo de água do Rio São Francisco é mínimo. Logo, as centrais eólicas instaladas no nordeste poderão produzir grandes

quantidades de energia elétrica evitando que se tenha que utilizar a água do rio São Francisco.

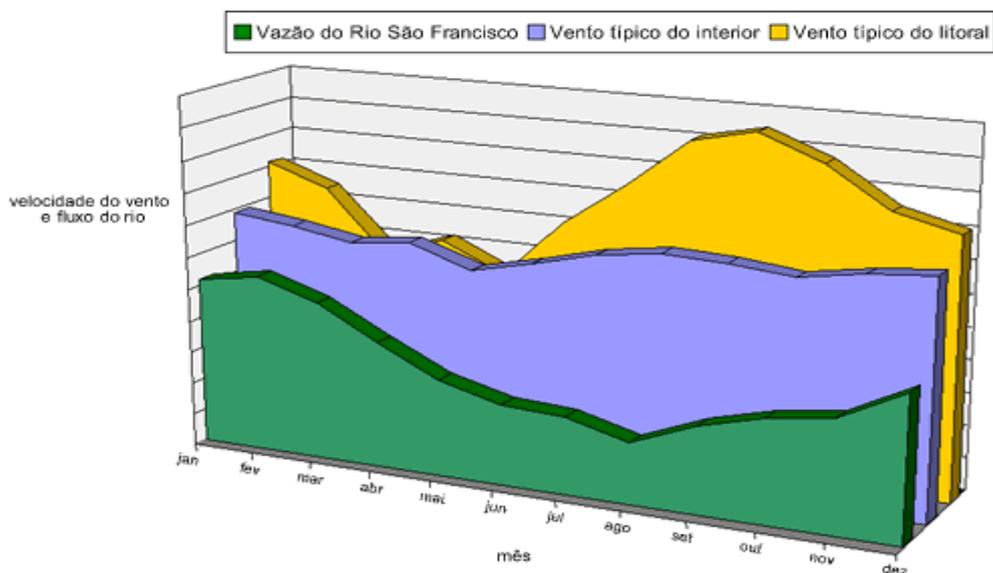


Figura 21 - Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento no nordeste do Brasil. <10>.

Estudos sobre a complementaridade sazonal hidro-eólica na região Sul-Sudeste do Brasil também foi realizada. A responsável foi a COPEL, em que fez simulações da inserção de uma usina de 50/200 MW no sistema interligado. Os dados anemométricos utilizados foram referentes ao período de 1972-1993. Os dados de vazão foram obtidos das mais importantes bacias hidrográficas das regiões Sul/Sudeste. As simulações da integração hidro-eólica foram executadas pela COPEL através do “Modelo de Simulação de Sub-Sistemas Equivalentes – MSSSE”.

As análises da integração de uma usina eólica de 50 MW no Subsistema Sul não demonstram complementaridade sazonal, devido às características climatológicas pluviais da região Sul.

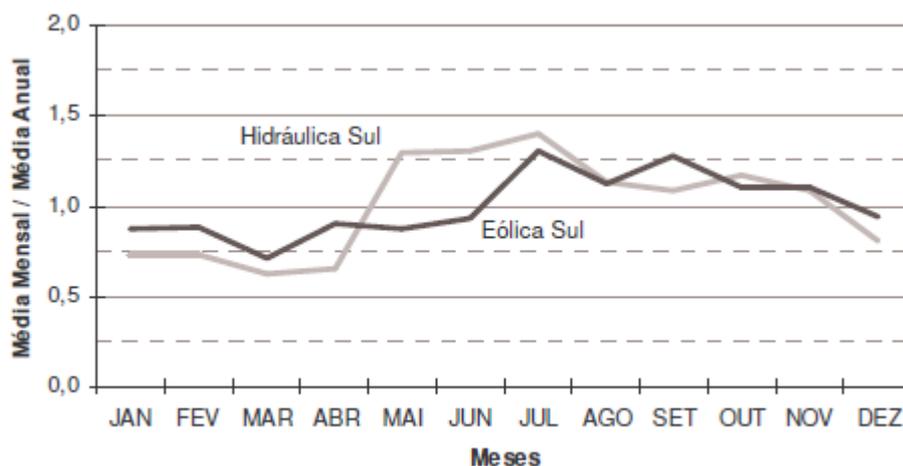


Figura 22 - Energia Hidráulica (Sul) e Energia Eólica em Palmas - Normalizadas - período 1979-1992. <10>.

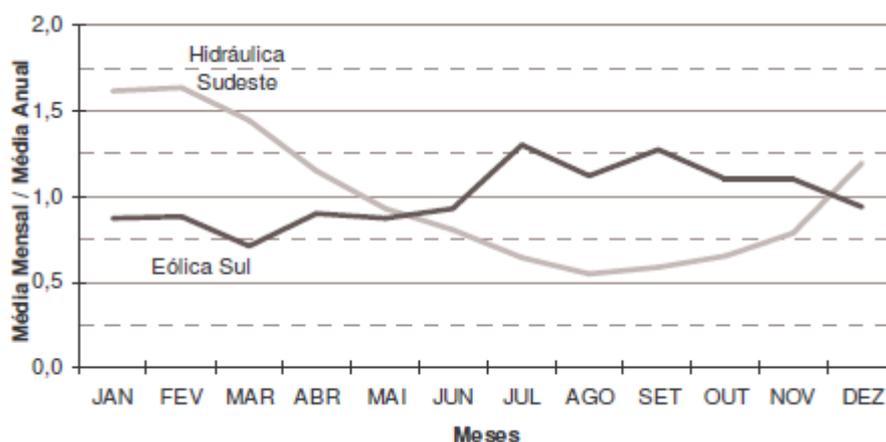


Figura 23 – Complementaridade hidro-eólica no sub-sistema Sudeste. <10>.

Considerando-se que o subsistema Sudeste é o mais pesado na geração e consumo de energia elétrica, foi também simulada a integração de uma usina eólica em Palmas nos subsistemas Sul/Sudeste. A complementaridade sazonal tornou-se então evidente: deve-se também observar que a geração hidrelétrica conjunta dos subsistemas Sul/Sudeste (Figuras 22 e 23) é de cinco vezes aquela só do Sul.

Conclui-se que simulações e modelagens adicionais devem ainda ser executadas para se avaliar mais detalhadamente a contribuição da energia eólica no sistema elétrico brasileiro, tendo em vista que as simulações, bem como os resultados aqui apresentados são introdutórios.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho destacou a energia eólica, mostrando que a mesma apresenta-se como solução para atender a carência de acesso à eletricidade, bem como atender ao rápido crescimento do consumo mundial. Mesmo em países com matriz energética baseada na fonte renovável da energia hídrica, caso do Brasil, existe a possibilidade de ocorrer carência no abastecimento devido a problemas climáticos.

Ficou evidenciado, através de revisão bibliográfica, que os trabalhos e as simulações que demonstram a complementaridade são bastante introdutórios, necessitando de trabalhos acadêmicos e técnicos que aprofundem sobre o tema em questão.

Fica comprovado que áreas favoráveis para empreendimentos eólicos estão situadas ao longo da extensa costa brasileira, coincidindo com os locais de maior consumo no extremo das linhas de transmissão, pois a maioria das usinas hidrelétricas está situada no interior do Brasil e neste contexto a implantação de aproveitamentos eólico-elétricos mais próximos aos grandes centros de consumo, além de melhorar o fator de capacidade do parque de geração de energia predominantemente hidrelétrico pela complementaridade sazonal hidro-eólica, podem também contribuir para o reforço e redução das perdas das redes elétricas.

Constata-se que devem ser agilizadas ações para inserção de blocos de geração eólica de forma a viabilizar economicamente esta participação, tendo em vista sua contribuição para o sistema elétrico brasileiro, possibilitando um equilíbrio na oferta de energia quando associado à geração hidráulica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALDABÓ, Ricardo. Energia Eólica. São Paulo: Artliber Editora, 2002.
- [2] Site sobre energias renováveis. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/energia-eolica>, acesso em 12/01/2013.
- [3] MME. Ministério de Minas e Energia. Disponível em http://www.mme.gov.br/see/noticias/lista_destaque/destaque_0121.html, acesso em 31/01/2013.
- [4] ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>, acesso entre os dias 28/11/2012 à 01/02/2013
- [5] Site sobre energia eólica. Disponível em: www.energiaeolica.com.br, acesso entre os dias 04/01/2013 à 31/01/2013.
- [6] EPE. Empresa de Pesquisas Energéticas. Disponível em: www.epe.gov.br, acesso em 02/02/2013.
- [7] DUTRA, R.M. Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor eólico brasileiro. Tese de Mestrado. UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia – COPPE. Rio de Janeiro, 2001.
- [8] ONS. Plano Anual da Operação Energética – PEN 2009. Sumário Executivo.
- [9] CRESESB/CEPEL. *Energia eólica – princípios e aplicações*. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/eolica>, acesso em 04/01/2013.
- [10] CBEE. Centro Brasileiro de Energia Eólica. *Testes e certificação de turbinas eólicas de grande porte – parte 1: curva de potência*. Disponível em: <http://www.eolica.com.br>, acesso em 18/02/2013.
- [11] DWIA. *Windpower note danish wind industry association annual report .no. 27 march 2002. Danish wind industry association. Editor: Søren Krohn, ISSN 1397 - 1697*. Disponível em <http://www.windpower.org>, acesso em 13/02/2013.
- [12] WWEA - World Wind Energy Association. *Press Release: World wind energy boom in 2005: 58.982 MW capacity installed*. Disponível em: <http://www.wwindea.org>, acesso em 19/12/2012.
- [13] AMARANTE, O.A.C.; SCHULTZ, D. J. *Wind energy of the state of paraná, Brazil. DEWI Magazin No. 15, August 1999*.

