

**UNIVERSIDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
INSTITUTO DE ESTUDOS TECNOLÓGICOS**

Paulo Henriques Amaral Filho

ENERGIA EÓLICA

M 03
2006
MEIO AMBIENTE

Juiz de Fora – MG
Junho de 2006

Paulo Henriques Amaral Filho

ENERGIA EÓLICA

Monografia de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Tecnologia em Gestão de Meio Ambiente do Instituto de Estudos Tecnológicos da Universidade Presidente Antônio Carlos como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Gestão de Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Gilmar Aparecido Lopes

Juiz de Fora - MG

Junho de 2006



Paulo Henriques Amaral Filho

ENERGIA EÓLICA

Monografia de Conclusão de Curso submetida ao curso Tecnologia em Meio Ambiente da Universidade Presidente Antônio Carlos como requisito parcial para a obtenção do título e aprovada pela seguinte banca examinadora:



Prof. M.Sc. Gilmar Aparecido Lopes

Universidade Presidente Antônio Carlos

Juiz de Fora

2006

Dedico esta monografia aos meus familiares
pelo apoio INCONDICIONAL em todos os
momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A minha família, pela confiança e motivação.

Ao Prof. Orientador, pelo auxílio em todas as etapas deste trabalho.

Aos professores e colegas de Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

A todos, que de forma direta ou indireta, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

O único caminho para se alcançar o verdadeiro sucesso é colocar a si próprio completamente a serviço da sociedade.

ARISTÓTELES

RESUMO

Essa monografia tem por escopo analisar a energia eólica, demonstrar seu mecanismo de formação, surgimento, custo, etc. Para conseguir a energia elétrica através do processo de eólica, é preciso levar grandes turbinas para lugares de muito vento. Essas turbinas quando rodam o movimento produz energia elétrica, que fica armazenada em um gerador, do qual é transmitida por cabos até os lugares onde ela vai ser consumida. Para a realização desse estudo, foi feita uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto. Ao final concluiu que esse tipo de energia tem um custo menor e que Tanto no Brasil quanto em todo mundo há uma grande potencialidade para produzir energia eólica

PALAVRAS-CHAVE: energia, vento, custo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.....	16
Figura 2.....	22
Figura 3.....	23
Figura 4.....	25
Figura 5.....	26
Figura 6.....	29
Figura 7.....	30
Figura 8.....	31
Figura 9.....	31
Figura 10.....	34

LISTA DE ILUSTRAÇÕES E GRÁFICOS

Ilustrações 1	12
Gráfico 1.....	29

SUMÁRIO

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.1 MECANISMO DE FORMAÇÃO DOS VENTOS	13
1.2 ORIGEM DA UTILIZAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA.....	15
1.3 SURGIMENTO DOS MOINHOS.....	15
1.4 USO DOS MOINHOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	16
1.5 SURGIMENTO DOS GERADORES	18
1.6 TIPOS DE TURBINAS	18
2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO.....	22
3 POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL.....	24
3.1 PROJETOS DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL	28
3.2 PROJETOS DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE ENERGIA	30
4 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO	32
5.1 CUSTO DA ENERGIA EÓLICA	36
5.1.1 CUSTOS DE PREPARAÇÃO DO PROJETO E DE INFRA-ESTRUTURAS.....	37
5.1.2 CUSTOS DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO.....	37
5.1.3 OPERABILIDADE DO SISTEMA.....	38
5.1.4 TEMPO DE VIDA	38

5.1.5 PERÍODO DE AMORTIZAÇÃO.....	38
5.1.6 VALOR MÉDIO DA VELOCIDADE DO VENTO.....	39
5.1.7 CUSTO ANUALIZADO DE ENERGIA PRODUZIDA COM SISTEMAS EÓLICOS.....	40
6 IMPACTOS AMBIENTAIS.....	41
CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

INTRODUÇÃO

Essa monografia de conclusão de curso tem por finalidade apresentar uma abordagem geral sobre energia eólica e suas características no Brasil e no mundo.

A energia eólica é vista, hoje, como uma das fontes alternativas de geração de eletricidade com perspectivas de gerar quantidades substanciais de energia sem os impactos ambientais.

Dentre as energias alternativas existentes e disponíveis no planeta terra destaca-se: energia solar, energia nuclear, Biomassa, em fase de estudo o uso do hidrogênio, isso requer outras fontes de energia para que possa ser utilizada, pois a adequação ecológica do hidrogênio depende da fonte usada em sua obtenção.

Assim, esse estudo buscará apresentar, o mecanismo de formação dos ventos, o surgimento dos moinhos, a evolução histórica da utilização da energia eólica entre outros, tudo com fulcro em demonstrar que a energia eólica tem um custo menor e com menor potencial de dano ao meio ambiente.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Mecanismo de formação dos ventos

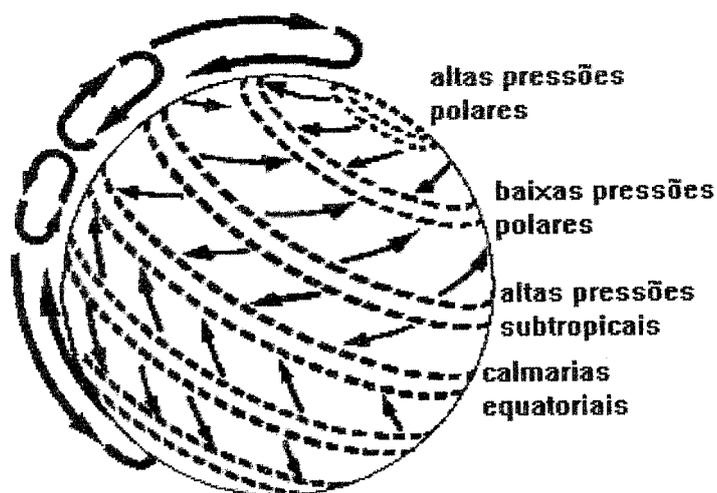
A energia eólica é a energia cinética dos deslocamentos de massas de ar gerados pelas diferenças de temperatura na superfície do planeta, resultante da associação da radiação solar incidente no planeta com o movimento de rotação da terra (AONDEVAMOS, 2006).

O termo *eólico* vem do latim *Aeolicus*, pertencente ou relativo a Eólico, deus dos ventos na mitologia grega e, portanto, pertencente ou relativo ao vento (WIKIPÉDIA, 2006).

De acordo com CBEE (2006) as regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos.

A Figura 1 a seguir apresenta esse mecanismo.

Figura 1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



Fonte: CBEE (2006)

A CBEE (2006) diz que a quantidade de energia disponível no vento varia de acordo com as estações do ano e as horas do dia. A topografia e a rugosidade do solo também tem grande influência na distribuição de frequência de ocorrência dos ventos e de sua velocidade em um local.

Além disso, a quantidade de energia eólica extraível numa região depende das características de desempenho, altura de operação e espaçamento horizontal dos sistemas de conversão de energia eólica instalados.

1.2 Origem da utilização da energia eólica

Estudos recentes indicam que a primeira utilização da energia eólica foi com embarcações, por volta de 2800 AC, uma vez que há pouco tempo um barco foi encontrado num túmulo sumeriano, daquela época, no qual havia também remos auxiliares.

Corroborando com essa afirmativa, Ferreira e Leite (2006) sustentam que foram os egípcios os primeiros a fazer uso prático do vento, em torno do ano 2800 AC, quando eles começaram a usar velas para ajudar a força dos remos dos escravos.

Ao longo dos anos vários tipos de embarcações à vela foram desenvolvidos, com grande destaque para as Caravelas. Os fenícios, pioneiros na navegação comercial, se utilizavam barcos movidos exclusivamente à força dos ventos. (AONDEVAMOS, 2006).

Mas o uso da energia eólica, não ficou apenas nas embarcações, elas também começaram a ser utilizada para moagem de grãos e bombeamento de água.

1.3 Surgimento dos moinhos

Parece ser difícil afirmar com segurança a época em que surgiram os primeiros moinhos de vento. Ferreira e Leite (2006) apontam que foram os persas e outras civilizações do oriente médio, mais especificamente, os mulçumanos, que começaram a construir moinhos de vento verticais elevados ou *panemones*, para ser usado como força nas mós, na moagem de grãos e bombeamento de água.

Apesar de alguns doutrinadores sustentarem que foram os povos do oriente médio que havia trazido a idéias sobre os moinhos de vento para a Europa, através das cruzadas,

Ferreira e Leite (2006) asseveram que provavelmente foram os holandeses que desenvolveram o moinho de vento horizontal, com hélices, comuns nos campos dos holandeses e ingleses.

Divergências a parte, o certo é que a partir de então, as forças dos ventos tornaram-se a fonte primária da energia mecânica medieval inglesa. Durante esse período, os holandeses contaram com a força do vento para bombeamento de água, moagem de grãos e operações de serraria.

Com os melhoramentos técnicos, já na idade média, houve a fabricação de lâminas aerodinâmicas e os desenhos dos moinhos em poste, ou pilastra, logo foram devolvidos para segurarem as lâminas, contudo, as pessoas ainda tinham que direcionar sua máquina de vento até a invenção, em 1750, de um direcionador automático direcionado e acionado pelo próprio vento (FERREIRA; LEITE, 2006).

Mas foi Daniel Halliday quem desenvolver o que se tornou o mais famoso moinho de vento americano de fazenda, que ainda hoje é muito utilizado em fazenda de gado na América, Europa e Austrália. Esses moinhos são usados principalmente para bombear água. Essa máquina é o familiar moinho de vento multi-lâmina.

1.4 Uso dos moinhos para geração de energia

Como foi dito anteriormente, a energia eólica foi utilizada há milhares de anos com finalidades de bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Mas para a geração de eletricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, com alguns dos primeiros desenvolvimentos creditados aos dinamarqueses (ANEEL, 2006).

Ilustração 1 – Exemplo de turbina idealizada por Darrieus



Fonte: Ferreira e Leite (2006)

Já por volta da década de trinta algumas indústrias americanas começaram a fabricar e vender os "carregadores de vento", na maior parte aos fazendeiros do ventoso Great Plains. Tipicamente, essas máquinas poderiam fornecer até 1000 watts (1kW) de corrente contínua quando o vento estava soprando (AONDEVAMOS, 2006). Mas foi com o programa subsidiado pelo governo americano com a finalidade de estender linhas de força às fazendas e propriedades rurais em lugares remotos que esse tipo de produção de energia ganhou força.

Ferreira e Leite (2006) dizem que muitos países europeus também construíram geradores de vento, tais como os franceses que, durante os anos 1950 e 1960, construíram desenhos avançados de unidades de 100 kW a 300 kW. Os alemães também construíram geradores de vento para prover força extra para sua linha de utilidades, mas por causa da rígida competição dos geradores de fluido fóssil, essas máquinas experimentais foram eventualmente descartadas. Mas com a crise internacional do petróleo na década de 1970 é

que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial (ANEEL, 2006).

1.5 Surgimento dos geradores

Os avanços da aerodinâmica e surgimento da eletrônica permitiram o aparecimento de aerogeradores muito eficientes e com o custo por KW, quando utilizado em sistemas de grande porte interligados a rede de distribuição, comparável com o das hidroelétricas. Com isto desde a década de 80, tem sido cada vez mais comum a instalação de parques eólicos em vários países principalmente da Europa e nos Estados Unidos.

De acordo com ANEEL (2006) atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. Essas turbinas são de várias formas: tem aquelas de eixo horizontal ou de eixo vertical

1.6 Tipos de turbinas

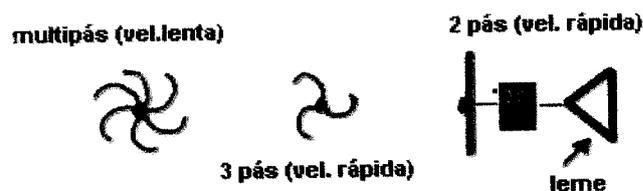
No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos – eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono etc.

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, como ilustrado na Figura abaixo (CBEE, 2006).

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 (CBEE, 2006).

As turbinas eólicas de eixo horizontal: podem ser de uma, duas, três, quatro pás ou multipás. A de uma pá requer um contrapeso para eliminar a vibração. As de duas pás são mais usadas por serem fortes, simples e mais baratas do que as de três pás. As de três pás, no entanto, distribui as tensões melhor quando a máquina gira durante as mudanças de direção do vento. As multipás não são muito usadas, pois são menos eficientes.

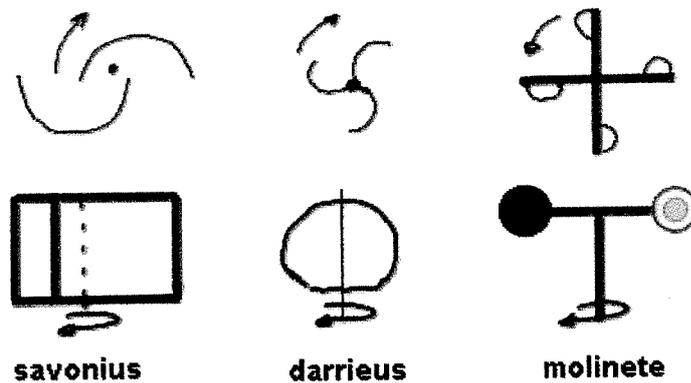
Figura 2 – Turbinas Eólicas Eixo Horizontal



Fonte: ANEEL (2006)

Turbinas eólicas do eixo vertical: não são muito usadas, pois o aproveitamento do vento é menor. As mais comuns são três: SAVONIUS, DARRIEUS E MOLINETE.

Figura 3 – Turbinas Eólica de eixo horizontal



Fonte: ANEEL (2006)

A potência máxima extraída de uma turbina eólica é:

$$P_{\max.} = 16/27 \cdot 1/2 \cdot P \cdot a \cdot v < 0,593$$

Onde:

P = densidade do ar (tabelado)

A = área correspondente ao diâmetro da área varrida pelas pás

V = velocidade do vento

A taxa de conversão é de aproximadamente de 59% , quando o sistema funciona de maneira otimizada.

Abaixo será demonstrado esta fórmula de forma sucinta:

$$P = \frac{W}{\Delta t}$$

Potência é igual ao trabalho (Energia) dividido pelo tempo:

realizado pelo vento - que neste caso é igual a sua energia cinética - é: $W = E_c = \frac{mv^2}{2}$,

então: $P = \frac{\frac{mv^2}{2}}{\Delta t} = \frac{m \cdot v^2}{2 \Delta t}$, mas como $\frac{m}{\Delta t} = \dot{m} = Q = \rho \cdot V \cdot A$, temos:

$$P = \frac{\rho V^3 A}{2}$$

onde ρ é a densidade do ar, V é a velocidade do vento e A é a área varrida pelas hélices do rotor. Talvez seja esta a fórmula mais importante para se conhecer o aproveitamento da energia eólica.

Como ilustração um vento passa de 10km/hora para 11 km/hora (aumento de 10%) a potência se eleva em 33%, o que mostra como é importante a escolha de um lugar com vento mais velozes para o melhor aproveitamento da energia eólica. Outro exemplo é sobre a área varrida pelo rotor. Com um hélice de 3 m de diâmetro e um vento de 32 km/hora teríamos uma potência de 1000 W; se dobrarmos o diâmetro da hélice para 6 m e mantivermos o vento em 32 km/hora a potência irá para 4000 W. Isto ocorre pois a área varia com o quadrado do raio, ou seja, dobrando-se a área do rotor aumentamos a potência em quatro vezes.

Em 2001, a Associação Européia de Energia Eólica estabeleceu como meta a instalação de 11.500 MW até o ano 2005. Essas metas foi cumprida muito antes do esperado aconteceu em 2001. As metas atuais são de 40.000 MW na Europa até 2010. Nos Estados Unidos, o parque eólico existente é da ordem de 4.600 MW instalados e com um crescimento anual em torno de 10%. Estima-se que em 2020 o mundo terá 12% da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200GW (CBEE, 2006).

Recentes desenvolvimentos tecnológicos (sistemas avançados de transmissão, melhor aerodinâmica, estratégias de controle e operação das turbinas etc.) têm reduzido custos e melhorado o desempenho e a confiabilidade dos equipamentos. O custo dos equipamentos, que era um dos principais entraves ao aproveitamento comercial da energia eólica, reduziu-se significativamente nas últimas duas décadas.

2 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DE UMA REGIÃO

Para que seja realizado a avaliação do potencial eólico de uma região, deve ser feita uma análise sistemática de coleta e análise de dados sobre a velocidade e o regime de ventos.

Geralmente, uma avaliação rigorosa requer levantamentos específicos, mas dados coletados em aeroportos, estações meteorológicas e outras aplicações similares podem fornecer uma primeira estimativa do potencial bruto ou teórico de aproveitamento da energia eólica.

O organograma abaixo de ilustra bem os procedimentos a ser seguidos

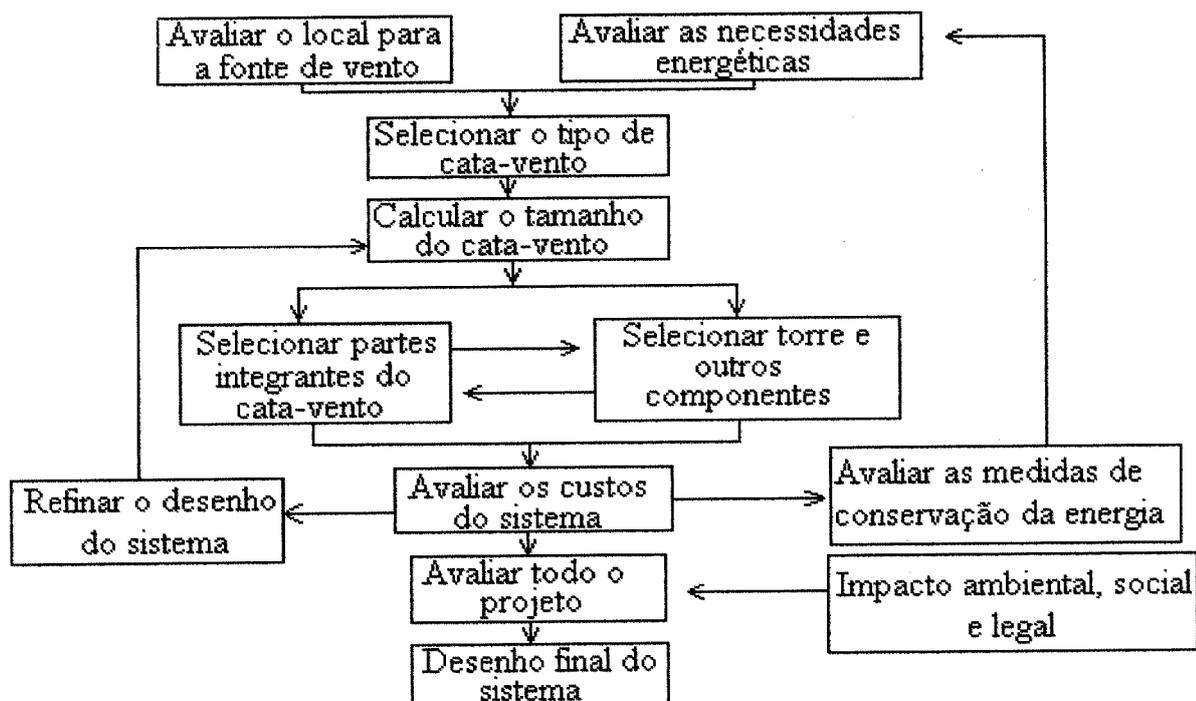
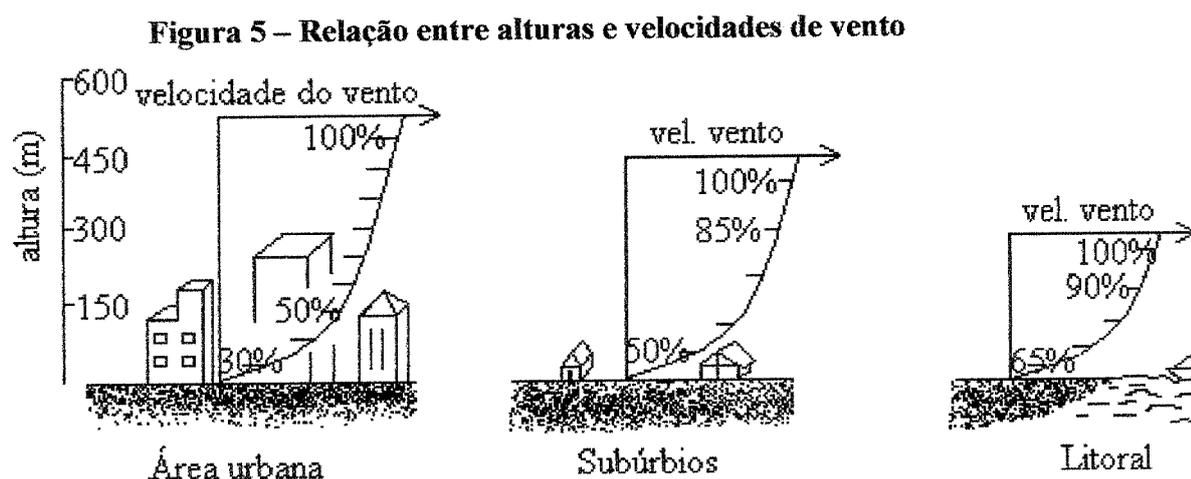


Figura 4 - A avaliação do potencial eólico de uma região

Fonte: Fernando e Leite (2006).

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a 500 W/m^2 , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s (CBEE, 2006).

A figura abaixo ilustra as diferentes áreas (urbana, subúrbios, ou ao nível do mar) e a sua relação entre suas alturas e velocidades de vento



Fonte: Ferreira e Leite (2006)

Com este esquema, podemos perceber que regiões que possuem construções elevadas como prédios, só atingem velocidades razoáveis de vento após uma elevada altura. Já nas áreas em que só existem casas e pequenas construções, esta taxa diminui e assim, em alturas um pouco menores já temos ventos satisfatórios; no último caso mostrado, ao nível do mar, se vê que os ventos já são muito mais rápidos em altitudes menos elevadas que nos exemplos anteriores (FERREIRA E LEITE, 2006).

De acordo com já foi dito anteriormente, a potência teórica gerada pelas "máquinas de vento" varia com o cubo da velocidade do vento local, o que demonstra que isto, mais uma é

necessário uma análise prévia do lugar onde se pretende instalar os equipamentos, para que se tenha um aproveitamento melhor da potencialidade da energia eólica FERREIRA E LEITE, 2006)..

Assim, a conversão de energia eólica em regiões com muitos obstáculos ficam prejudicadas. Porém, mesmo nestas regiões é possível o aproveitamento, mesmo que já em escalas menores. O que é preciso saber é se nestas regiões onde há um aproveitamento mais restrito é ainda viável economicamente se construir tais equipamentos para se converter a energia eólica para eletricidade, por exemplo (FERREIRA E LEITE, 2006)..

Existe uma regra prática que permite a utilização de cata-ventos em regiões que possuem construções e/ou obstáculos naturais, tais como árvores muito grandes ou elevações (morros) no solo.

Ferreira e Leite (2006) apresentam uma regra que diz que o cata-vento nestas regiões tem que ficar a uma distância mínima de 7 vezes a altura que o obstáculo tem, ou seja, se numa casa de 5 metros de altura, por exemplo, se desejar implantar um sistema de captação e conversão da energia eólica, este sistema deverá estar a uma distância de 35 metros para que haja um aproveitamento melhor dos geradores e que as turbulências causada pela uniformidade do chão, das construções e dos obstáculos naturais sejam minimizadas, não interferindo muito no aproveitamento do sistema

3 POTENCIAL EÓLICO DO BRASIL

Como foi descrito anteriormente, a avaliação precisa do potencial de vento em uma região é o primeiro e fundamental passo para o aproveitamento do recurso eólico como fonte de energia. No Brasil, assim como em várias partes do mundo, quase não existem dados de vento com qualidade para uma avaliação do potencial eólico.

De acordo com a CEEL (2006) os primeiros anemógrafos computadorizados e sensores especiais para energia eólica foram instalados no Ceará e em Fernando de Noronha/Pernambuco apenas no início dos anos 90.

Os bons resultados obtidos com aquelas medições favoreceram a determinação precisa do potencial eólico daqueles locais e a instalação de turbinas eólicas. Com isso, muitos estados brasileiros seguiram esses mesmos passos no Ceará e Pernambuco e iniciaram programas de levantamento de dados de vento. Atualmente, há aproximadamente de cem anemógrafos computadorizados espalhados por vários estados no Brasil. (CEEL, 2006).

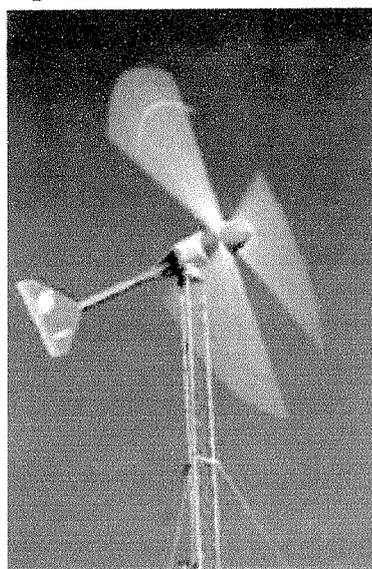
No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cataventos multipás para bombeamento d'água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado. A análise dos dados dos ventos de vários locais no Nordeste confirmaram as características dos ventos comerciais (trade-winds) existentes na região: velocidades médias de vento altas, pouca variação nas direções do vento e pouca turbulência durante todo o ano. (CEEL, 2006).

Grande atenção tem sido dirigida para o Estado do Ceará por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico através de

na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, por exemplo, uma central eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa) com excelentes condições de vento.

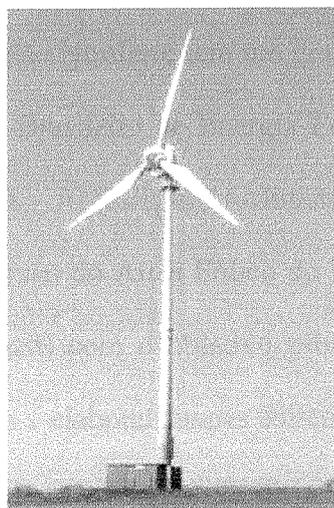
A capacidade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com turbinas eólicas de médio e grande portes conectadas à rede elétrica.

Figura 6 – Exemplo de Turbina de pequeno porte



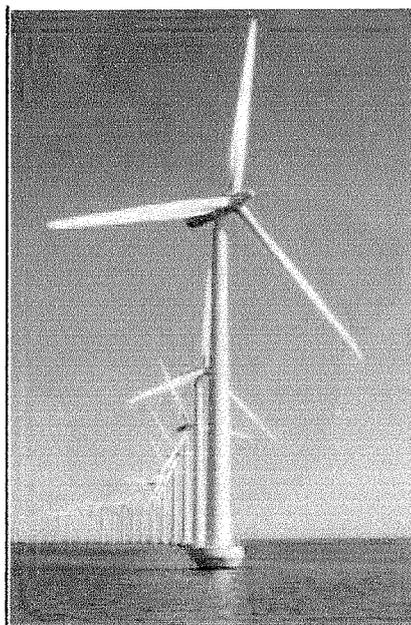
Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica. Disponível em: www.eolica.com.br

Figura 7 – Exemplo de turbina de médio porte



Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica. Disponível em: www.eolica.com.br

Figura 8 - Exemplo de turbina de médio porte



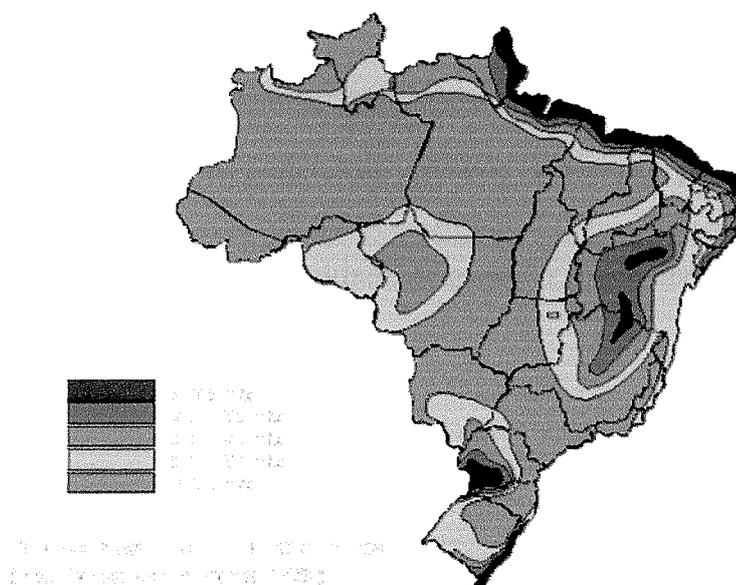
Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica. Disponível em: www.eolica.com.br

Além disso, existem dezenas de turbinas eólicas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas - bombeamento, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural (CEEL, 2006).

Foram observados fatores de forma de Weibull (da distribuição estatística de Weibull), k , maiores que 3 - valores considerados muito altos quando comparados com os ventos registrados na Europa e Estados Unidos. (CEEL, 2006).

Assim, pode-se dizer que a região Nordeste tem um grande potencial de Dada recursos eólicos da região Nordeste, o Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, com o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL e do Ministério de Ciência e Tecnologia - MCT lançou, em 1998, a primeira versão do Atlas Eólico do Nordeste do Brasil (WANE - Wind Atlas for the Northeast of Brazil) com o objetivo principal de desenvolver modelos atmosféricos, analisar dados de ventos e elaborar mapas eólicos confiáveis para a região. Um mapa de ventos preliminar do Brasil gerado a partir de simulações computacionais com modelos atmosféricos é mostrado na figura abaixo.

Figura 9 - Mapa de ventos do Brasil. Resultados preliminares do CBEE.



Fonte: CBEE (2006)

Em 1999, a companhia paranaense de energia, COPEL, publicou o mapa do potencial eólico do estado do Paraná. Foram utilizados dados de vento de cerca de vinte estações anemométricas para simulações em modelo atmosférico de micro escala com apresentação gráfica em ferramenta GIS.

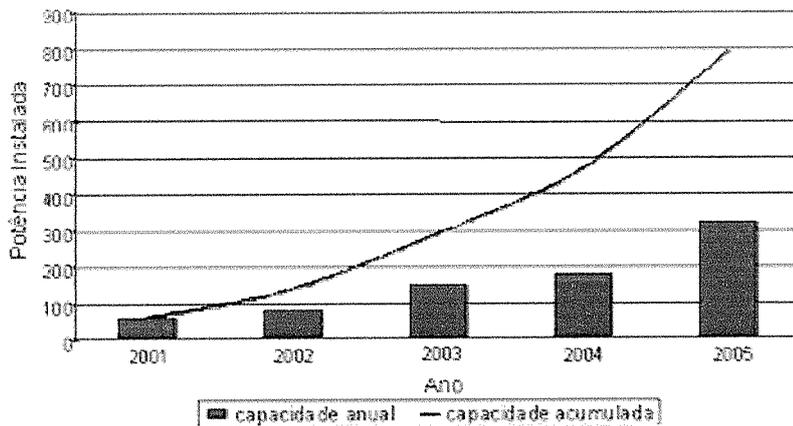
Também em 1999, o CBEE passou a utilizar o modelo atmosférico de meso escala MM5 para elaborar a segunda versão do Atlas Eólico do Nordeste (WANEB 2) e realizar o Atlas Eólico Nacional. Este novo projeto envolve a coleta e processamento de dados de vento de boa qualidade medidos em estações terrenas e na atmosfera (sondas, satélites).

A simulação da climatologia com o modelo MM5 em resoluções de 30km e a elaboração do atlas eólico a partir da combinação dos mapas de vento (obtidos da simulação) com informações de topografia, uso do solo, influências locais e outras restrições (ferramenta GIS). Um modelo atmosférico de micro escala será usado em áreas de interesse para aumentar a resolução do Atlas para espaçamentos de 1km² CBEE (2006).

.Baseado no WANEB 2 (ainda não publicado) o CBEE estima que o potencial eólico existente no Nordeste é de 6.000MW

O gráfico abaixo ilustra a evolução da capacidade de geração eólica instalada no Brasil, desde 1992 aos dias atuais. Grande parte da capacidade eólica existente foi instalada no ano de 1999 (primeiros projetos de venda de eletricidade por produtor independente).

Gráfico 1 A evolução da capacidade de geração eólica instalada no Brasil



Fonte: CBEE (2006).

3.1 Projetos de energia eólica no Brasil.

Apesar de vários trabalhos e pesquisas científicas realizadas nas décadas de 70 e 80 a geração de energia a partir de turbinas eólicas no Brasil teve início apenas em julho de 1992, com a instalação de uma turbina de 75kW na ilha de Fernando de Noronha, através de iniciativa pioneira do Centro Brasileiro de Energia Eólica - CBEE, na época conhecidos como Grupo de Energia Eólica da Universidade Federal de Pernambuco.

De acordo com a CBEE, os principais projetos de energia eólica do Brasil são mostrados na Figura abaixo.

Durante os últimos 15 anos, diversos projetos pioneiros foram realizados pelo Centro Brasileiro de Energia Eólica, através de convênios com instituições governamentais e privadas. Os projetos/convênios mais representativos são apresentados abaixo:

CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) - Projeto da primeira turbina eólica de grande porte do Brasil conectada à rede elétrica na Ilha de Fernando de Noronha,

CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) - Projeto básico: Locação e medidas da primeira central eólica do Brasil - IMW em Minas Gerais :

INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária) - Projeto para promoção de energia eólica no setor rural do Brasil, cadastramento e elaboração de banco de dados, fornecimento de assistência a propriedades rurais no Brasil, análise técnica e econômica de casos típicos:

COELBA (Companhia Energética do Estado da Bahia) - Análise do potencial eólico e estudos de viabilidade econômica para diversos grupos do setor privado;

COELCE (Companhia Energética do Ceará) - Análise do potencial eólico e estudos de viabilidade econômica para diversos grupos do setor privado;

CEAL (Companhia Energética de Alagoas) - Análise do potencial eólico e estudos de viabilidade econômica para diversos grupos do setor privado;

CNPq/PTU (Programa do Trópico Úmido) - Projeto, instalação e instrumentação de sistema híbrido para eletrificação da Ilha de Tamaruteua, localizada no município de Marapanim, Pará (cooperação com a Universidade Federal do Pará);

MMA (Ministério de Meio Ambiente e Amazônia Legal) - Projeto de instalação da turbina OWW-225 (225kW) no Centro Brasileiro de Energia Eólica;

BNB (Banco do Nordeste do Brasil) - Projeto de sistemas híbridos de pequeno porte para eletrificação rural na região Nordeste :

Calibração e testes de sensores e anemógrafos;

Análise aeroelástica de torre/rotor de turbinas eólicas;

Desenvolvimento de programas computacionais dedicados à caracterização do vento;

Projeto de turbinas eólicas de grande porte adaptadas às condições do Brasil;

Projeto de sistemas híbridos eólico /solar /diesel de pequeno porte.

Figura 10 Os principais projetos de energia eólica do Brasil



FONTE: CBEE (2006)

Além do mais, projetos de pesquisa e desenvolvimento pioneiros no Brasil estão sendo realizados, como descritos a seguir:

FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos / Ministério de Ciência e Tecnologia) apoio geral de infra-estrutura / instrumentação para testes de turbinas eólicas:

3.2 Projetos de Sistemas Híbridos De Energia

Sistemas híbridos de energia (Hybrid Power Systems) são sistemas autônomos de geração elétrica que combina fontes de energia renovável e geradores convencionais. O objetivo deles é produzir o máximo de energia possível das fontes renováveis (sol e vento), enquanto mantidas a qualidade da energia e a confiabilidade especificada para cada projeto.

Estes sistemas são adequados para atender as necessidades energéticas de locais isolados devido ao alto custo da eletrificação de lugares com baixa demanda e de difícil acesso. Geralmente, os sistemas isolados eletrificados utilizam geração termelétrica com grupos geradores diesel.

No Brasil existem mais de 400 sistemas isolados de grande porte (com mais de 1400 MW de potência instalada) e inúmeros sistemas pequenos que utilizam óleo diesel como fonte geradora de energia. Já foi demonstrado que sistemas híbridos de energia podem representar uma solução mais econômica para muitas aplicações e também proporcionar uma fonte mais segura de eletricidade devido à combinação de diversas fontes de energia. Além do mais, o uso de energia renovável reduz a poluição ambiental causada pela queima de óleo diesel, transporte e armazenamento.

O único sistema híbrido eólico/diesel de grande porte instalado no Brasil é o sistema da Ilha de Fernando de Noronha. A geração diesel da Ilha tem uma capacidade instalada de aproximadamente 2MW com 2 grupos geradores de 350kVA e 3 de 450kVA. Existem ainda vários grupos geradores de pequeno porte. Duas turbinas eólicas, 75kW e 225kW de potência nominal, estão conectadas diretamente à rede elétrica formando um sistema integrado. Um sistema de supervisão central deverá ser instalado em breve para garantir o perfeito

funcionamento do sistema de forma automatizada. A energia gerada pelas turbinas eólicas atualmente contribui com cerca de 25% da demanda da Ilha.

Vários projetos de sistemas híbridos eólico /solar /diesel de pequeno porte foram desenvolvidos para comunidades isoladas e outras aplicações. Entre eles estão:

Sistema híbrido para testes do CBEE	
Local	Recife, Pernambuco
Data de instalação	Agosto de 1995
Projeto	CBEE
Aplicação	Pesquisa e demonstrações
Características técnicas	Uma turbina eólica de 1,5kW de potência nominal, com diâmetro do rotor de 3m (3 pás) e uma torre de 18m de altura. Os módulos fotovoltaicos somam 360Wp e o banco de baterias tem 180Ah @ 12VDC de capacidade. Um controlador central é responsável pelo funcionamento automático do sistema. A instrumentação do sistema permite a monitoração e a coleta de dados.

Fonte: CBEE (2006)

4 ENERGIA EÓLICA NO MUNDO

De acordo com Revista Exame (2005) a capacidade de capacidade eólica instalada no mundo vem aumentando consideravelmente nos últimos anos, principalmente na Alemanha, EUA, Dinamarca e Espanha, onde a potência adicionada anualmente supera 3.000 MW.

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. Dinamarca investiu, neste 15 anos, mais em energia elétrica que qualquer outro país europeu. Isto é decorrente da longa tradição da utilização do vento como forma de energia.

A primeira turbina que gerou eletricidade foi construída em 1891. O programa energético dinamarquês de hoje ainda faz parte do estabelecido em 1976. O principal objetivo deste é fazer a Dinamarca menos dependente de suprimento de energia importada. Subseqüentemente, argumentos em defesa do meio ambiente estão sendo levados em conta.

Figura 10 – Dinamarca



Fonte: CBEE (2006)

Dinamarca é uma peça chave no mercado das turbinas de vento. O país é responsável por cinco empresas que supriram 60% de toda a demanda mundial no ano de 1996. Estas cinco empresas empregam mais de 2000 pessoas no país, e via terceirização, um adicional de 10000 empregos. Apenas em 1996, a indústria vendeu 1360 turbinas, dentre as quais 944 para 21 países diferentes. Os maiores compradores são Alemanha (26%), Espanha (12%), e Inglaterra (10%). O total de vendas alcançou um pico em 1997 com 1654 turbinas, representando uma geração de 968 MW.

A Dinamarca, em 1997 conseguiu um recorde anual com a instalação de 533 novas turbinas no seu território gerando 300 MW. Isto contribui para um total de 4850 turbinas de vento, que equivale a 7% de toda a energia consumida pela Dinamarca. A indústria espera que a produção total de energia gerada pelo vento alcance 2500 MW por ano em 2005, dentre as quais 750 serão de instalações continentais.

Já na França, o principal impasse da expansão na utilização de energia eólica na França tem sido o poder público que não deseja dividir com empresas privadas e pagar uma tarifa comparável ao custo de geração de energia elétrica (FERREIRA E LEITE, 2006).

Électricité de France (EDF), controla toda demanda para o mercado. O programa desenvolvido pela *Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie* (ADEME), estava concentrada no uso de pequenas turbinas geradas à diesel que se localizavam no além mar da costa francesa, em áreas remotas no continente Francês, e duas usinas eólicas interligadas com as linhas de EDF.

Apenas 2,5 MW foram instalados até 1994, a maioria na primeira usina eólica francesa. Localizada em Port-la-Nouvelle no Sul da França a pequena usina de apenas 5 turbinas rende 5,1 milhões de kWh de produção anual. Seguindo a instalação de uma turbina na costa de Dunkerque no começo de 1990, um segundo projeto seria completado em 1995 perto da fronteira com a Bélgica.

Como o projeto atual da França se baseia na utilização de energia atômica e como muitos dos núcleos geradores de energia atômica estão perto do seu tempo de vida útil a EDF terá que mudar o seu projeto de energia ou senão terá que investir em um novo projeto de elevado custo na construção de usinas nucleares.

A energia eólica é mais difundida nos EUA. Alguns projetos que estão em andamento nos EUA atingiram uma meta que é muito importante para o desenvolvimento futuro da utilização da energia eólica, conseguiu diminuir drasticamente o custo do kWh, que variam de 3,9 centavos (em algumas usinas nos Texas) a 5 centavos ou mais (no Pacífico Noroeste). Estes custos são similares de muitas formas convencionais de geração de energia, e se espera que tais custos diminuam ainda mais em um intervalo de 10 anos.

Atualmente a energia eólica é responsável por apenas 1% de toda energia produzida no país. O Departamento de Energia espera um aumento de 600% na utilização de energia

eólica nos próximos 15 anos. Espera-se que no meio do próximo século o vento possa ser responsável por 10% de toda energia norte-americana, o mesmo que a parcela produzida pela energia hidrelétrica (FERREIRA E LEITE, 2006).

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 (CBEEL,2006).

Segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m. Essa proporção varia muito entre regiões e continentes, chegando a 32% na Europa Ocidental, como indicado na Tabela a seguir:

Tabela.1 Distribuição da área de cada continente segundo a velocidade média do vento

Região/Conte- nte	6,4 a 7,0		7,0 a 7,5		7,5 a 11,9	
	10 Km	(%)	10 km	(%)	10km	(%)
África	3.750	12	3350	11	200	1
Europa Ocidental	345	8,6	416	10	371	22
Austrália	850	8	400	4	550	5
América do Norte	2550	12	1.750	8.3	350	15
América Latina	1400	8	850	5	950	5
Mundo	13.650	10	9550	7	8350	6

Mesmo assim, estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano. (FERREIRA E LEITE (2006).

5 VANTAGENS DA ENERGIA EÓLICA

De acordo com Monteiro (2006) As abordagens econômicas de sistemas eólicos com ligação à rede podem ser de dois tipos diferentes:

- Estudos na perspectiva das autoridades governamentais para planejamento energético.

Esta abordagem faz um estudo comparativo dos custos anuais de energia \$/kWh para as diferentes fontes de energia. Esta abordagem é feita ao nível de economia internacional não incluindo fatores sociais ou influências governamentais tais como taxas de inflação, taxas de CO2 ou outro tipo de taxas.

- Estudos na perspectiva de investidores privados ou distribuidores de energia elétrica.

Nesta abordagem já são considerados os efeitos dos sistemas de taxas aplicados por cada país tais como taxa de inflação, taxa de atualização, taxas do sistema, etc. Como consequência deste tipo de abordagem a nível de economia nacional verifica-se que a viabilidade de sistemas de energia eólica difere muito de país para país. Ainda dentro deste tipo de abordagem a análise econômica poderá ser feita de duas formas diferentes: considerando os custos anuais de energia \$/kW; ou fazendo um estudo individual para cada projeto onde se tem em conta o montante do investimento, o cash-flow e o tempo de amortização do investimento.

Estima-se que em grande número de países a energia eólica é competitiva com energia fóssil e com energia nuclear desde que se considerem custos sociais e custos externos tais como o desenvolvimento econômico, diversidade energética, produção dispersa e benefícios ambientais. Estudos da EWEA (European Wind Energy Association) mostram que o preço \$/kWh de energia eólica podem ser reduzidos 25% com ajuda dos novos desenvolvimentos de tecnologia e com um incremento dos volumes de produção.

Organizações internacionais sem preferências por energia eólica (por exemplo a IAEA, International Atomic Energy Agency) prevêem que a energia eólica seja, antes de 2010, competitiva com as energias fósseis e nuclear sem que seja necessário ter em conta os custos externos e sociais (MONTEIRO, 2006).

5.1 Custo da energia eólica

O custo da energia gerada através de sistemas eólicos é basicamente determinada pelos seguintes parâmetros:

- Custo total de investimento
- Custos de fabrico dos geradores eólicos
- Custos de preparação do projeto, custos de infra-estruturas, etc.
- Custos de operação e manutenção
- Valor percentual da operabilidade do sistema
- Tempo de vida
- Valor médio da velocidade do vento no local de instalação
- Período de amortização
- Taxa de atualização

De acordo com Monteiro (2006) Estudos sobre os custos de fabrico para os fabricantes Europeus é de 167 milhares de escudos por kW o que equivale a 70 milhares de escudos por metro quadrado (em relação à superfície varrida pelas pás). Existem aerogeradores com preços de 117 milhares de escudos por kW e 57 milhares de escudos por metro quadrado. No entanto, devemos ter cuidado pois estes baixos custos estão relacionados com uma menor altura das torres implicando que estes aerogeradores não sejam os mais viáveis. Estes preços referem-se a custos individuais sendo negociáveis os preços para projetos de larga escala.

5.1.1 Custos de preparação do projeto e de infra-estruturas.

Este tipo de custos depende das características do local tal como a utilização do terreno, inclinação do terreno, proximidade de estradas, proximidade do ponto de interligação, etc. Estudos sobre este tipo de custo indicam valores da ordem de 43 milhares de escudos por kW para máquinas entre 450 kW e 600 kW localizadas em terreno plano. Estes preços não incluem a construção de estradas nem os custos da linha de interligação ou reforço de linhas já existentes (MONTEIRO,2006)

5.1.2 Custos de operação e manutenção

Os custos de operação e manutenção incluem: serviços, consumíveis, reparação, seguro, administração, aluguer do local, etc. Estudos recentes dinamarqueses e alemães estimam que os custos de operação e manutenção, para aerogeradores entre 450 kW e 500 kW, variam entre 1.9 e 2.9 escudos/kWh dos quais metade corresponde ao seguro. Para uma máquina de 55 kW com 10 anos os custos de O&M estão tipicamente entre 3.8 e 5.8 escudos/kWh.

5.1.3 Operabilidade do sistema

A operabilidade do sistema é dada em percentagem e representa o tempo de operabilidade do sistema desde que a velocidade do vento seja superior à velocidade mínima de arranque (aproximadamente 5m/s). Para as máquinas modernas de fabrico Europeu a operabilidade é aproximadamente de 98%.

5.1.4 Tempo de vida

O tempo de vida para as máquinas Europeias é de aproximadamente 20 anos. Algumas peças individuais são substituídas ou renovadas regularmente. Consumíveis tais como o óleo da caixa de engrenagens, travões e amortecedores, etc. são substituídos de 2 em 2 anos. Partes do sistema de orientação das pás devem ser substituídos todos os 5 anos. Componentes vitais tais como mancais da caixa de engrenagens e mancais do gerador devem ser substituídos a metade do tempo de vida do aerogerador.

5.1.5 Período de amortização

Para o cálculo económico do custo anualizado da energia é utilizado como período de amortização o tempo de vida do equipamento que é aproximadamente 20 anos. Para investimentos privados será conveniente usar o período de amortização real, que corresponde ao tempo de amortização do empréstimo bancário. Normalmente os projetos privados de energia eólica, na Europa, são financiados em 10-20% a fundo perdido e os restantes 90-80% são cobertos por empréstimos bancários com um período de amortização entre 8 e 12 anos(MONTEIRO, 2006).

5.1.6 Valor médio da velocidade do vento

O mais importante parâmetro para o cálculo da viabilidade de um investimento é o conhecimento dos recursos eólicos do local. Teoricamente a energia produzida varia diretamente com o quadrado da velocidade média do vento e a potência varia com o cubo da velocidade. Na prática, a potência produzida por um aerogerador varia com a velocidade do vento segundo a curva de potência desse mesmo aerogerador e a energia produzida será o integral da potência produzida durante o tempo que estiver em funcionamento. Por seu lado o custo anualizado da energia é inversamente proporcional à potência produzida (MONTEIRO, 2006).

Dados experimentais recolhidos na Noruega, Alemanha, Dinamarca e no Reino Unido, nos últimos 3 anos, mostram que os sistemas eólicos instalados atualmente com velocidades médias de 4.7 m/s a 10 m de altura produzem 800 kWh/m²; com 5 m/s produzem 1000 kWh/m² e com 9 m/s produzem valores anuais de energia superiores a 2000 kWh/m².

5.1.7 Custo anualizado de energia produzida com sistemas eólicos

Os aerogeradores modernos produzem, hoje em dia, eletricidade a preço competitivo. Os custos anualizados de energia foram reduzidos de 35\$00/kWh em 1980 para os valores atuais que rondam os 10\$00/kWh em locais com bons recursos eólicos. Prevê-se que com as novas tecnologias se atinjam no ano 2007 custos anualizados de energia da ordem dos 6\$00/kWh. Para investimentos privados, em que a avaliação econômica é baseada em períodos de amortização menores e com taxas de juros mais altas, os custos anualizados são cerca de 1.7 vezes superiores. Os investimentos de sistemas eólicos de energia poderão ser amortizados em menos de 3 anos de operação para locais com bons recursos(MONTEIRO, 2006).

6 IMPACTOS AMBIENTAIS

Geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda. As pequenas centrais podem suprir pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para o processo de universalização do atendimento.

Quanto às centrais de grande porte, estas têm potencial para atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (SIN) com importantes ganhos: contribuindo para a redução da emissão, pelas usinas térmicas, de poluentes atmosféricos; diminuindo a necessidade da construção de grandes reservatórios; e reduzindo o risco gerado pela sazonalidade hidrológica, à luz da complementaridade citada anteriormente.

Entre os principais impactos sócio-ambientais negativos das usinas eólicas destacam-se os sonoros e os visuais. Os impactos sonoros são devidos ao ruído dos rotores e variam de acordo com as especificações dos equipamentos (ARAÚJO, 1996). Segundo o autor, as turbinas de múltiplas pás são menos eficientes e mais barulhentas que os aerogeradores de hélices de alta velocidade. A fim de evitar transtornos à população vizinha, o nível de ruído das turbinas deve atender às normas e padrões estabelecidos pela legislação vigente.

Os impactos visuais são decorrentes do agrupamento de torres e aerogeradores, principalmente no caso de centrais eólicas com um número considerável de turbinas, também conhecidas como fazendas eólicas.

Os impactos variam muito de acordo com o local das instalações, o arranjo das torres e as especificações das turbinas. Apesar de efeitos negativos, como alterações na paisagem natural, esses impactos tendem a atrair turistas, gerando renda, emprego, arrecadações e promovendo o desenvolvimento regional.

Outro impacto negativo das centrais eólicas é a possibilidade de interferências eletromagnéticas, que podem causar perturbações nos sistemas de comunicação e transmissão

de dados (rádio, televisão etc (CBEE, 2006). De acordo com este autor, essas interferências variam muito, segundo o local de instalação da usina e suas especificações técnicas, particularmente o material utilizado na fabricação das pás. Também a possível interferência nas rotas de aves deve ser devidamente considerada nos estudos e relatórios de impactos ambientais (EIA/RIMA).

CONCLUSÃO

Ao final desse estudo, pode-se concluir que o vento constitui uma imensa fonte de energia natural a partir da qual é possível produzir grandes quantidades de energia elétrica. Além de ser uma fonte de energia inesgotável, a energia está longe de ser causadora de problemas ambientais.

O interesse pela energia eólica aumentou nos últimos anos, principalmente, depois do disparo do preço do petróleo.

O custo de geradores eólicos tem um preço, mas o vento é uma fonte inesgotável enquanto o petróleo não. Em um país subdesenvolvido como o Brasil, onde quem governa são os empresários, não é o interesse de gastar dinheiro em uma nova fonte de energia eles, preferem continuar usando o petróleo. Considerando o grande potencial eólico de várias regiões do Brasil, seria possível produzir eletricidade a partir do vento a um custo de geração inferior a US\$ 50/mKw.

Existem, atualmente, mais de 20.000 turbinas eólicas em operação no mundo, produzindo mais de 2 bilhões de Kwh anualmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAEEL. **Energia Eólica**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 20 de junho de 2005.

AONDEVAMOS. **Energia Eólica**. Disponível em <http://www.aondevamos>. Acesso em 20 de junho de 2006.

ARAÚJO TS, Fontes alternativas de energia para a agricultura. Curso de especialização por tutoria à distância, 1985.

CBEE - Centro Brasileiro de Energia Eólica. Disponível em <http://www.eolica.com.br>. Acesso em 20 de jun. 2006.

CEEL. Centro de Energia Elétrica. Disponível em <http://www.ceel.gov.br>. Acesso em 20 de junho de 2006.

FERREIRA Ricardo; LEITE, Breno Moreira da Costa. Aproveitamento de energia. Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~em313/paginas/eolica/eolica.htm>, Acesso em 20 de junho de 2006.

GOLDENBERG, José. **Energia no Brasil**. São Paulo, 1976

KRANERT, P. **Energia Eólica**. *Energia*, v-4, n23, p 24-30, 1982.

MONETIRO, Alberto. **Energia do vento e da água**. *Energia*. São Paulo, gecho, 1994.

NASCIMENTO, JB. **Energia Eólica no Brasil e no mundo - uma visão geral**, (tese de doutorado em andamento - 1996) STONER, Carol Hopping. **A produção de sua própria energia I - Manual prático de energias renováveis**, 1976.

WIKIPEDIA. **Energia Eólica**. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/boml> Acesso em 20 de jun. 2006.