

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Ricardo Terciote

..... E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM

Gilberto De Martino Jannuzzi
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Análise da Eficiência de um Sistema Eólico Isolado

Autor : **Ricardo Terciote**

Orientador: **Gilberto De Martino Jannuzzi**

02/02

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

Análise da Eficiência de um Sistema Eólico Isolado

Autor : Ricardo Terciote

Orientador: Gilberto De Martino Jannuzzi

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2002
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

T271a Terciete, Ricardo
 Análise da eficiência de um sistema eólico isolado /
 Ricardo Terciete.--Campinas, SP: [s.n.], 2002.

 Orientador: Gilberto de Martino Jannuzzi.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

 1. Força eólica. 2. Recursos energéticos. 3. Energia
 – Fontes alternativas. 4. Recursos naturais renováveis. I.
Jannuzzi, Gilberto de Martino. II. Universidade Estadual
de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III.
Título.


**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO


**Análise da Eficiência de um
Sistema Eólico Isolado**

Autor : Ricardo Terciote


Orientador: Gilberto De Martino Jannuzzi



**Prof. Dr. Gilberto De Martino Jannuzzi, Presidente
FEM - UNICAMP**



**Prof. Dr. Ennio Peres da Silva
IFGW - UNICAMP**



**Prof. Dr. Luis Antonio Rossi
FEAGRI - UNICAMP**

Campinas, 26 de fevereiro de 2002

**UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE**

447862002

Agradecimentos

Aos meus pais, Cláudio (in memorian) e Maria Estela; meu irmão, Alexandre, pelo carinho e amor que sempre foram fundamentais em todos os momentos de minha vida;

À minha namorada, Adriana Ribeiro, que deu o apoio e o incentivo necessário nas horas mais difíceis;

A todos os professores e amigos do DE que estiveram sempre presentes e acreditaram na conclusão desse trabalho. Pela força nos momentos de fraqueza pelo carinho e amizade sempre presentes na hora certa;

Ao meu orientador Gilberto De Martino Jannuzzi pelo incentivo e orientação ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

*O nosso ideal,
devemos colocá-lo nas estrelas,
ainda que fiquemos no meio do caminho.*

Tolstói (1828-1910)

Resumo

Terciote, R., *Análise da Eficiência de um Sistema Eólico Isolado*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 129 p. Dissertação (Mestrado)

Atualmente vários países vêm investindo na complementação e transformação de seus parques energéticos com a introdução de fontes alternativas de energia, sendo que as questões ambientais alavancaram em muito estes investimentos, principalmente devido aos impactos causados pelas formas tradicionais de geração de energia. O desenvolvimento da energia eólica no mundo apresenta-se como uma das mais importantes e promissoras tecnologias na geração complementar de energia. Neste trabalho, apresentam-se a evolução da energia eólica ao longo do tempo, um panorama brasileiro e mundial atual, sua utilização na geração de energia elétrica, os impactos ambientais e suas perspectivas. Considerando o crescimento de mercado e da tecnologia, apresentam-se os resultados de um projeto elaborado na UNICAMP, com intuito de avaliar a eficiência energética do mesmo e verificar a característica dos ventos. Os resultados encontrados mostram que a energia eólica deve ser encorajada em locais com boas condições de vento para que seja possível gerar energia limpa de forma competitiva.

Palavras chave: energia eólica, eficiência energética, fontes renováveis.

Abstract

Terciote, R., *Stand-Alone Wind Energy System: Energy Efficiency Analyses*. Campinas: Mechanical Engineering Faculty, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 129 p. M.Sc. Diss.

Currently several countries are investing in the transformation of their energy supply systems by introducing alternative sources of energy. In many instances, environmental issues motivated the major part these investments. Wind energy development in the world is one of the most important and promising energy technologies with less environmental impacts. The main objective of the work is to present an evaluation of a small (500W) wind system installed at UNICAMP. We study the available wind data and measurements of electricity production over several months. The results show that the wind energy must be encouraged in places with good conditions of wind to generate competitive clean energy.

Key words: wind energy, energy efficiency, renewable sources

Sumário

1. Introdução	001
1.1. Objetivos e Estrutura do trabalho	004
2. Evolução Histórica e Sistemas de Energia Eólica	006
2.1. A Energia eólica no mundo	008
2.1.1. A potência e a quantidade de turbinas eólicas no mundo	009
2.1.2. Custos	011
2.1.3. Estado da arte no mundo	017
2.2. A Energia eólica no Brasil	020
2.2.1. As primeiras metas para o desenvolvimento da energia eólica no Brasil	022
2.2.2. O estado da arte da energia eólica no Brasil	024
2.2.3. Perspectivas da energia eólica no Brasil	026
2.3. Aplicação dos sistemas eólicos	029
2.3.1. Sistemas interligados à rede	029
2.3.2. Sistemas isolados	029
2.3.3. Sistemas híbridos	030
2.4. Componentes do sistema de geração eólica	030
2.4.1. Suportes	033
2.4.2. Sistemas de captação	035
2.4.3. Sistemas de orientação	040
2.4.4. Sistemas de regulação	040
2.4.5. Sistemas de transmissão	042

2.4.6. Sistemas de geração	043
2.4.7. Acessórios	046
3. A energia eólica e o Meio Ambiente	048
3.1. Benefícios ambientais	049
3.1.1. Emissão de gases	050
3.2. Problemas para o meio ambiente	052
3.2.1. Impacto sobre a fauna	052
3.2.2. Ruídos	054
3.2.3. Interferência eletromagnética	056
3.2.4. Uso da terra	057
3.2.5. Impacto visual	058
4. Fundamentos teóricos da energia eólica	060
4.1. Fundamentos teóricos	061
4.1.1. A energia contida nos ventos	061
4.1.2. Eficiência de Betz	063
4.1.3. Eficiência dos sistemas eólicos	065
4.1.4. Fatores que influenciam o desempenho dos aerogeradores	068
4.2. Representação estatística do regime de ventos	076
4.2.1. Distribuição de Weibull	077
4.2.2. Distribuição de Rayleigh	079
5. Descrição do projeto	081
5.1. Equipamentos utilizados	082
5.2. Dados utilizados	086
5.3. Metodologia de trabalho	086
6. Apresentação e análise dos resultados	089
6.1. Regime dos ventos	089
6.2. As variáveis da distribuição de Weibull	097
6.3. A eficiência do sistema	098
7. Conclusões	106
7.1. Recomendações e alternativas de melhoria	108

8. Referências Bibliográficas	110
9. Anexos	
Anexo 1 - Tabela de valores diários das principais medições	116
Anexo 2 - Dados Mensais: Velocidade do vento (m/s)	121
10. Apêndices	
Apêndice 1 - Geração Distribuída	123
Apêndice 2 - Legislação a respeito de Energia Eólica	125
Apêndice 3 - Mapa Eólico da Região Nordeste e do Brasil	130
Apêndice 4 - Novas usinas eólicas no Brasil	132

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.	007
Figura 2.2 – Custo relativo de turbinas de pequeno porte.	014
Figura 2.3 – Redução potencial dos custos para a energia eólica.	015
Figura 2.4 – Redução dos custos de geração de eletricidade eólica na Dinamarca.	017
Figura 2.5 - Geração de Eletricidade Eólica Mundial - 20TWh (1999).	018
Figura 2.6 – Potência eólica instalada no mundo.	019
Figura 2.7 – Capacidade instalada de energia eólica no mundo em 1990 e 1999(MW).	019
Figura 2.8 - Principais projetos de energia eólica no Brasil	026
Figura 2.9 – Componentes de um sistema eólico	032
Figura 2.10 – Aerogerador em corte	033
Figura 2.11 – Diferentes tipos de rotores	037
Figura 2.12 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil	041
Figura 2.13 - Fluxo aderente ao perfil	042
Figura 3.1 – Prática de atividades agropecuárias em parques eólicos	049
Figura 3.2 - Estimativa de mortes anuais de pássaros nos Países Baixos	053
Figura 3.3 - Nível de ruído para diversas turbinas eólicas disponíveis em 1995.	056
Figura 3.4 – Prática de atividades agrícolas em parques eólicos	057
Figura 4.1 - Aumento da velocidade dos ventos com a altura (para α igual a 0,1).	071
Figura 4.2 – As classes de rugosidade e as paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu.	073

Figura 4.3 - Aumento da velocidade dos ventos com a altitude.	074
Figura 4.4 - Relação entre densidade do ar e temperatura.	075
Figura 4.5 - Relação entre densidade do ar e altitude.	075
Figura 4.6 – Influência do parâmetro k na curva de distribuição de Weibull.	078
Figura 4.7 – Influência da velocidade média na distribuição de Rayleigh.	080
Figura 5.1 – Diagrama esquemático da instalação eólica	083
Figura 5.2 – Foto do cubículo e do painel que abriga os componentes do sistema	083
Figura 5.3 – Foto do local da instalação	084
Figura 5.4 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho	088
Figura 6.1 – Regime de ventos para o ano de 2001	089
Figura 6.1-a – Janeiro de 2001	089
Figura 6.1-b – Fevereiro de 2001	090
Figura 6.1-c – Março de 2001	090
Figura 6.1-d – Abril de 2001	091
Figura 6.1-e – Maio de 2001	091
Figura 6.1-f – Junho de 2001	092
Figura 6.1-g – Julho de 2001	092
Figura 6.1-h – Agosto de 2001	093
Figura 6.1-i – Setembro de 2001	093
Figura 6.1-j – Outubro de 2001	094
Figura 6.1-k – Novembro de 2001	094
Figura 6.1-l – Dezembro de 2001	095
Figura 6.2 – Comparação da velocidade média dos ventos.	097
Figura 6.3 – Energia contida nos ventos e energia produzida pelo aerogerador	099
Figura 6.3-a – Abril de 2001	099
Figura 6.3-b – Maio de 2001	100
Figura 6.3-c – Junho de 2001	100
Figura 6.3-d – Julho de 2001	101
Figura 6.3-e – Agosto de 2001	101
Figura 6.3-f – Setembro de 2001	102
Figura 6.3-g – Outubro de 2001	102

Figura 6.3-h – Novembro de 2001	103
Figura 6.3-i – Dezembro de 2001	103
Figura 6.4 – Energia mensal produzida pelo aerogerador (Abril a Dezembro/2001)	097

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Média da potência de turbinas eólicas instaladas a cada ano e valor acumulativo (kW).	010
Tabela 2.2 – Número de turbinas eólicas instaladas em todo o mundo.	011
Tabela 2.3 – Balanço do custo de projetos em energia eólica na Europa	012
Tabela 2.4 – Balanço do custo para instalação das fazendas eólicas	013
Tabela 2.5 – Balanço do custo durante a vida útil das fazendas eólicas	013
Tabela 2.6 – Viabilidade da energia eólica em relação à velocidade do vento	015
Tabela 2.7 – Custos de geração de eletricidade para fontes renováveis de energia.	016
Tabela 2.8 – Taxas de crescimento do mercado mundial entre 1994 e 1999	018
Tabela 2.9 – Taxa de crescimento dos dez maiores mercados de Energia Eólica.	020
Tabela 2.10 – Estado atual das aplicações eólicas no Brasil.	025
Tabela 3.1 – Uso da terra para diferentes tecnologias de geração de eletricidade	052
Tabela 3.2 – Emissões de CO ₂ de diferentes tecnologias de geração de eletricidade.	058
Tabela 4.1 – Valores médios da eficiência de conversão nos estágios do aerogerador	066
Tabela 4.2 – Rendimento dos geradores em função da potência	068
Tabela 4.3 - Valores típicos de α	071
Tabela 5.1 – Equipamentos utilizados no projeto	085
Tabela 6.1 – Fator multiplicativo para diferentes valores de α	096
Tabela 6.2 – Parâmetros da distribuição de Weibull	098
Tabela 6.3 – Valores obtidos para o sistema eólico (Abril/2001 a Dezembro/2001)	104
Tabela 6.4 – Eficiência do sistema eólico (Abril/2001 a Dezembro/2001)	105

Nomenclatura

AKF - Amternes og Kommunernes Forskningsinstitut

ANEEL – Agência Nacional de Energias Elétrica

AWEA – American Wind Energy Association

CDG – Carl Duisberg Gesellschaft

Cepagri – Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura

CHESF – Companhia Hidroelétrica do São Francisco

COELCE – Companhia de Eletricidade do Ceará

COPEL – Companhia Paranaense de Eletricidade

CRESESB - Centro de Referência para as energias solar e eólica Sérgio de Salvio Brito

CTA – Centro Técnico Aeroespacial

DEWI - Deutsches Windenergie Institut

DWTMA - Danish Wind Turbine Manufacture's Association

EPRI - Electric Power Research Institute

EWEA – European Wind Energy Association

FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola

FEM – Faculdade de Engenharia Mecânica

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia

MME – Ministério de Minas e Energia

NREL - National Renewable Energy Laboratory

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

RERL – Renewable Energy Research Laboratory

UFPA – Universidade Federal do Pará

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas

WEA - World Energy Assessment

Capítulo 1

Introdução

Atualmente vários países vêm investindo na complementação e transformação de seus parques energéticos com a introdução de fontes alternativas de energia. As questões ambientais alavancaram em muito estes investimentos, principalmente devido aos impactos causados pelas formas tradicionais de geração de energia.

Vários governos estão traçando novas estratégias de fornecimento de energia elétrica a curto e a longo prazos devido à preocupação com o aumento do consumo de eletricidade nos últimos anos. Esta preocupação justifica um planejamento mais eficaz e rigoroso para essas estratégias, de forma a suprir as necessidades da população. Neste contexto, inserem-se as fontes renováveis de energia, as quais têm aumentado sua participação nos mercados e também deixando de se limitar a comunidades isoladas, seu principal nicho de aplicação no passado.

As fontes alternativas de energia, como a solar fotovoltaica, de biomassa, eólica, pequenas centrais hidrelétricas, etc, têm sido aplicadas para vários fins e o principal tem sido gerar eletricidade para as comunidades isoladas, principalmente aquelas que se encontram afastadas da rede convencional de energia elétrica. Os projetos que visam a complementação energética da rede convencional por fontes alternativas fazem parte de outra abordagem, chamada geração distribuída, sendo que neste caso, a energia eólica se mostra uma excelente opção. Por esta razão, vários países da Europa e Estados Unidos têm investido amplamente na instalação de um número cada vez maior de parques eólicos para o fornecimento de energia elétrica, aumentando a

potência de aerogeradores e adicionando novas tecnologias aplicadas ao desempenho e à confiabilidade do sistema. Desse modo, a energia eólica tem conquistado um importante espaço na matriz energética mundial.

Não se pode negar que o desenvolvimento da energia eólica para geração de energia elétrica teve seu grande impulsionador na crise do petróleo na década de setenta. A busca por fontes alternativas de energia juntamente com políticas ambientalistas proporcionou um amadurecimento tecnológico compatível com as condições e necessidades de fornecimento. Não se pode ignorar a importância da energia eólica para o futuro energético global onde, cada vez mais, questões ambientais influenciarão nas decisões. A energia eólica é uma fonte alternativa que apresenta muitas vantagens na geração de grandes blocos de energia. Em todo o mundo, o uso da energia eólica no parque complementar de energia tem sido amplamente difundido e espera-se um crescimento ainda mais significativo (Greenpeace International *et al*, 1999).

As questões ambientais, iniciadas com grande pressão devido aos acidentes nucleares nos reatores de Three Mile Island em 1979, nos Estados Unidos e, mais tarde, em 1986 na cidade de Chernobyl, ex-União Soviética, impulsionam a comunidade mundial de forma a buscar soluções novas, eficientes e ecologicamente corretas para o fornecimento de energia elétrica, abrindo um grande espaço para a popularização das energias renováveis. As fontes alternativas tornam-se cada vez mais prioridade nos novos projetos energéticos, uma vez que os impactos ambientais relacionados à implantação, principalmente de fazendas eólicas, são mínimos e podem ser significativamente minimizados com estudos prévios.

O desenvolvimento sustentável¹ inclui, sem dúvida, as fontes renováveis de energia, tentando conciliar a necessidade energética da sociedade e a natureza, objetivando encontrar uma fonte de energia que seja menos agressiva ao meio ambiente. Sem exceção, estas fontes também acarretam algum tipo de impacto, sendo mais brandos aqueles decorrentes das fontes renováveis de energia. A energia solar com aproveitamento fotovoltaico ou térmico, a hidroeletricidade, a energia eólica, a biomassa, a energia das marés e a energia geotérmica estão entre as fontes

¹ Em 1987, a Comissão Mundial da ONU sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), presidida por Gro Harlem Brundtland e Mansur Khalid, apresentou um documento denominado *Our Common Future*, mais conhecido por relatório Brundtland. Este relatório diz que “o desenvolvimento sustentável é aquele que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade de as futuras gerações satisfazerem as suas próprias necessidades”.

energéticas que terão sua importância aumentada no cenário energético mundial tendo o governo e a sociedade participação decisiva na transição de um mundo baseado em energias não renováveis para fontes de energia que se encaixem na proposta do desenvolvimento sustentável.

Com o sensível crescimento de mercado a favor da energia eólica, nota-se queda nos preços dos aerogeradores ao longo das últimas décadas, tornando-a ainda mais competitiva com outras fontes de geração devido à evolução da tecnologia, das características operacionais aplicadas à energia eólica e não somente às questões de custo. O custo “zero” de seu combustível (ventos), baixo custo de manutenção, o curto espaço de tempo necessário para sua instalação e operação, entre outros fatores, vêm consolidando o espaço da energia eólica entre as demais fontes de energia.

Mesmo ainda em fase de implantação de algumas centrais eólicas no Brasil, esta energia é uma fonte que deve ser explorada e largamente utilizada principalmente nas regiões² onde as características do vento a tornam técnica e economicamente viável; locais estes que, de acordo com o Atlas Eólico do Brasil (ainda em versão preliminar³) apresentam ventos com velocidades médias anuais superiores a 6 m/s (medições a 10 metros de altura).

A partir da reforma do setor elétrico⁴, a questão do uso da energia eólica ganhou novo rumo ao introduzir novos elementos como a livre concorrência, criando um novo cenário que pode favorecer novos investimentos em fontes renováveis alternativas, principalmente pelo produtor independente e pelo auto produtor de energia. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) tem desenvolvido um importante papel na utilização das fontes alternativas de energia, com resoluções que incentivam a produção. Como exemplo, tem-se a Resolução nº 233/1999 (publicada no Diário Oficial de 30 de julho de 1999) a qual trata do “Valor Normativo”, que limita o repasse, para as tarifas de fornecimento, dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica, por parte dos concessionários e permissionários.

² Principalmente em alguns locais do litoral nordestino.

³ O Atlas Eólico do Brasil, mesmo ainda em fase preliminar, mostra-se como um importante esforço da ELETROBRÁS e do CEPEL na atualização dos dados publicados em 1988 no Atlas do Potencial Eólico Nacional, elaborado pela Fundação Padre Leonel Franca (PUC-RJ), em convênio com a ELETROBRÁS. No Apêndice 3 apresenta-se o Mapa Eólico da região Nordeste.

O desenvolvimento da humanidade através da utilização cada vez maior de fontes renováveis de energia minimizará os impactos ambientais.

1.1 Objetivos e estrutura do trabalho

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar os resultados do experimento realizado com energia eólica, instalado na Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI - da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, supervisionado pelo Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia Mecânica - FEM, com intuito de avaliar a eficiência energética do sistema instalado, sugerindo possíveis melhorias⁵.

Em particular, melhorar a eficiência na produção de eletricidade significa melhorar o aproveitamento da energia disponível nos ventos para a produção de eletricidade e isto é de suma importância para a maioria dos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Apresentam-se ainda os fatores que influenciam na análise da eficiência energética para a produção de eletricidade a partir dos ventos (altura da torre, local da instalação, velocidade dos ventos), os fundamentos teóricos que governam a energia eólica e sua relação com o meio ambiente, apresentando os principais impactos ambientais.

Esta dissertação foi dividida em 7 capítulos e neste capítulo, estão a introdução, os objetivos e a estruturação do trabalho, justificando a escolha do tema.

A seguir, no capítulo 2, elabora-se um panorama brasileiro e mundial da energia eólica como fonte alternativa de geração de energia elétrica, exemplificando os sistemas eólicos e descrevendo seus principais componentes. Ainda neste capítulo é descrito um retrospecto histórico da utilização dos aerogeradores e sua evolução tecnológica, bem como o estado da arte da energia eólica no Brasil e no mundo. Nesse mesmo segmento, são levantados quais países têm absorvido essas tecnologias, suas estratégias e as perspectivas para os próximos anos.

⁴ No Apêndice 2 estão descritos alguns documentos que indicam em que medida o governo brasileiro, na figura da ANEEL, demonstra a intenção de atuar no sentido de incentivar e regulamentar o uso de fontes alternativas no parque gerador de energia elétrica.

⁵ Este projeto pode ser considerado uma continuação do projeto iniciado por Camargo (2000), o qual estudou as medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari.

No terceiro capítulo serão abordadas as questões ambientais que envolvem os parques eólicos, tratando de assuntos como emissão de CO₂, ruídos, impacto visual, entre outros, discutindo-os e comparando-os com as formas tradicionais de geração de energia.

No capítulo quatro, descrevem-se os fundamentos teóricos que governam a energia eólica, mostrando as equações e a eficiência dos sistemas eólicos, com destaque para a eficiência de Betz, os principais aspectos e equações que determinam a quantidade de eletricidade produzida a partir dos ventos, bem como os métodos estatísticos utilizados para caracterização do regime dos ventos, ferramenta importante na avaliação de parques eólicos.

No quinto capítulo é elaborada uma descrição do projeto montado, apresentando os equipamentos utilizados e a metodologia aplicada nesta dissertação para análise e tratamento dos dados obtidos a partir do sistema eólico instalado na UNICAMP.

A apresentação dos resultados obtidos é objetivo do capítulo 6, bem como a análise dos mesmos, buscando alcançar o objetivo principal da dissertação, fundamentada na avaliação da eficiência energética.

Finalmente o Capítulo 7 aborda as conclusões e recomendações para trabalhos futuros, apresentando alternativas de melhoria.

Capítulo 2

Evolução Histórica e Sistemas de Energia Eólica

Um dos grandes desafios do mundo de hoje é a questão relativa à energia quanto ao seu aproveitamento, visto que a imensa maioria da energia utilizada no planeta é de origem não renovável, podendo ela ser de fonte mineral, atômica ou térmica.

A energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos provêm do aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra.

As regiões tropicais e equatoriais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Consequentemente, 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 Fig. 2.1 a seguir apresenta esse mecanismo.

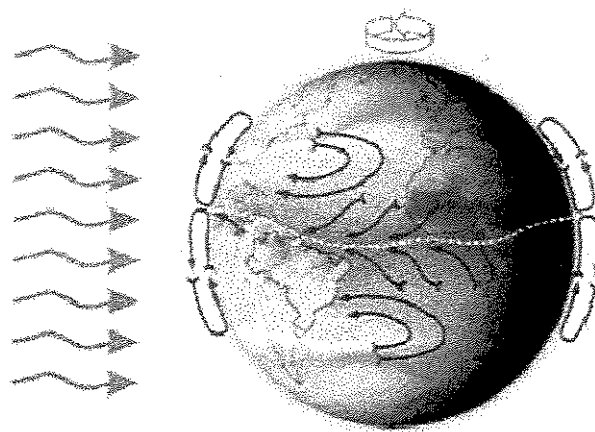


Figura 2.1 - Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

Fonte: Dutra (2001).

Além de ser uma fonte renovável, a energia eólica pode ser utilizada para o fornecimento de eletricidade para pequenas populações, onde não existam linhas de distribuição da concessionária de energia ou como energia complementar da rede elétrica convencional, como forma de geração distribuída⁶.

Um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas⁷: sistemas isolados (*stand alone system*), sistemas híbridos (*hybrid systems*) e sistemas interligados à rede (*grid connected*). Cada uma destas acarreta na utilização de diversos componentes⁸ que, juntamente com o aerogerador, formarão o sistema eólico. Estes sistemas possuem uma configuração básica e necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento.

Neste capítulo, é comentado o panorama da utilização de aerogeradores no Brasil e no mundo, descrevem-se as possíveis formas de conexão dos sistemas eólicos, além das principais características dos componentes utilizados. Porém, para o sistema instalado na UNICAMP, objeto de estudo deste trabalho, as especificações dos equipamentos e métodos utilizados serão apresentados no capítulo 5.

⁶ Deseja se deixar claro que existem outras formas de utilização (solar fotovoltaica, células de combustível, PCHs, microturbinas, motores a combustão interna) para a geração distribuída (ver apêndice 1).

⁷ Estas aplicações são descritas no item 2.3.

⁸ A seção 2.4 descreve os principais componentes dos sistemas eólicos.

2.1. A Energia Eólica no Mundo

A energia eólica vem sendo amplamente difundida em vários países, tendo iniciado na Alemanha, Dinamarca, Holanda e Estados Unidos e hoje presente em quase toda Europa, além de ter uma crescente penetração em países da América Latina, África e Ásia.

Com o aprimoramento tecnológico e o aumento de potência das máquinas os custos de geração de eletricidade a partir de energia eólica vêm diminuindo, tornando-a competitiva em locais com boas condições de vento.

Incentivos governamentais, dando suporte ao desenvolvimento, têm sido aplicados em diferentes países como reconhecimento às vantagens ambientais, bem como subsídios estaduais que objetivam estimular o mercado, reduzir os custos e compensar as desvantagens do uso de combustíveis convencionais. O apoio a iniciativas em pesquisa e desenvolvimento e acesso favorável das centrais eólicas à rede elétrica são ingredientes importantes para o contínuo sucesso dessa tecnologia.

Existem, atualmente, mais de 40.000 turbinas eólicas de grande porte em operação no mundo, com capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. No âmbito do Comitê Internacional de Mudanças Climáticas, está sendo projetada a instalação de 30.000 MW, por volta do ano 2030. Esta projeção pode ser estendida para 100.000 MW em função da perspectiva de venda dos “Certificados de Carbono”, alterações de políticas energéticas a serem discutidas e implementadas, bem como a utilização de instalações *offshore* (EWEA, 2000a). Na Dinamarca, a contribuição da energia eólica é de 12% da energia elétrica total produzida; no norte da Alemanha (região de Schleswig Holstein) a contribuição eólica já passou de 16% e a União Européia tem como meta gerar 10% de toda eletricidade a partir do vento até 2030 (EWEA, 2000b).

De acordo com a *American Wind Energy Association* (AWEA), durante a década de 90, a tecnologia de aerogeradores teve um crescimento anual de 22,6% (a maior entre as tecnologias de geração), apontando seu desenvolvimento como uma forma de geração de eletricidade competitiva global (Flowers *et al*, 2000).

A produção de eletricidade, a partir da energia eólica, cresceu de praticamente zero no início dos anos 80 para mais de 20 TWh no ano de 1999, com um montante de capital investido em torno de um bilhão de dólares. A capacidade de geração acumulada no mundo atingiu 10.000 MW em 1998. Os fabricantes instalaram mais de 2.400 MW neste mesmo ano e no fim de 1999 operava-se com quase 14.000 MW, sendo que Alemanha e Dinamarca lideram, com aproximadamente 50%, as novas instalações de turbinas eólicas (BTM Consult, 2000).

Várias nações estão se utilizando dos ventos e do sol para geração de eletricidade como um modo de atender as necessidades de áreas rurais sem o impacto ambiental que causaria a expansão de uma usina central. Países em desenvolvimento, como China e Índia, possuem infraestrutura industrial suficiente para construir turbinas eólicas, outros possuem demanda de energia que pode ser suprida pela energia eólica (Gipe, 1999).

2.1.1. A potência e a quantidade de turbinas eólicas no mundo

Com o crescimento do mercado na Europa e Estados Unidos, o desenvolvimento tecnológico fez-se necessário, com a utilização de novos modelos com potências cada vez maiores para aumentar a competitividade dos mercados dominados por diversas indústrias dinamarquesas e alemãs (DEWI, 2000).

Tanto em aplicações em terra quanto em aplicações *offshore*, as turbinas de grande potência (MW) têm criado um mercado promissor fazendo com que os novos investimentos no setor sejam destinados à redução dos custos e ao aprimoramento tecnológico, elevando assim, com uma maior participação no mercado, a média da potência instalada nos principais consumidores da energia eólica.

As turbinas de grande porte vêm ganhando espaço (principalmente a partir do ano de 1996) no mercado de geração de energia elétrica por meio da energia eólica em diversos países da Europa e também nos Estados Unidos, conforme verificado na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Média da potência de turbinas eólicas instaladas a cada ano e valor acumulativo (kW).

Ano	Dinamarca		Alemanha		Espanha		Suécia		Reino Unido		Estados Unidos	
	Pot. Média p/ano	Pot. Média Acum.	Pot. Média p/ano	Pot. Média Acum.	Pot. Média p/ano	Pot. Média Acum.	Pot. Média p/ano	Pot. Média Acum.	Pot. Média p/ano	Pot. Média Acum.	Pot. Média p/ano	Pot. Média Acum.
1992	215	119	185	117	125	100	212	221	361	299	223	105
1993	248	123	254	182	200	122	247	227	320	312	149	105
1994	364	131	371	264	320	142	412	257	469	353	336	112
1995	493	148	473	310	297	177	448	311	534	360	327	118
1996	531	181	530	358	420	258	459	345	562	398	511	120
1997	560	235	623	402	422	323	550	364	514	425	707	125
1998	687	271	783	465	504	367	590	414	615	442	723	132
1999	750	303	919	562	589	455	775	453	617	450	720	153

Fonte: BTM Consult (2000).

Além do aumento da potência das turbinas eólicas instaladas, a quantidade, na maioria dos países, também cresceu a cada ano. Mesmo com a substituição das turbinas de pequeno porte ao final de sua vida útil, o número total de turbinas quase dobrou em seis anos, levando a média de potência instalada a 320 kW, como pode ser visto na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Número de turbinas eólicas instaladas em todo o mundo.

País/Região	Total de unidades até o fim de 1993	Número acumulativo de turbinas instaladas						Total de unidades até o fim de 1999
		1994	1995	1996	1997	1998	1999	
América do Norte	16.014	315	66	-78	-158	416	-177	16.398
Europa	7.260	1.228	1.800	2.013	2.343	2.731	4.389	21.764
Ásia	503	785	1.837	917	594	33	438	5.098
Resto do Mundo	55	15	25	20	35	1	134	285
Total de Unidades	23.832	2.343	3.728	2.872	2.814	3.181	4.784	43.545
Acumulativo	23.832	26.166	29.894	32.766	35.580	38.761	43.545	
Capacidade instalada ao final de 1999: 13.932 MW								
Potência média mundial das turbinas eólicas: 320 kW								

Fonte: BTM Consult (2000).

2.1.2. Custos

Os custos de uma planta eólica têm caído substancialmente durante os últimos quinze anos e a tendência é que continuem a cair. O preço da energia elétrica produzida por turbinas eólicas tem sofrido quedas significativas, principalmente pelos seguintes fatores:

- Redução dos preços das turbinas eólicas;
- As turbinas modernas são cada vez maiores (em potência – apresentam média mundial na faixa de 600 a 750 kW e tamanho), com torres cada vez mais altas (aumentando assim a velocidade do vento interceptada pelo rotor)⁹;
- Melhor conhecimento da tecnologia e melhoria nos métodos de produção;
- Melhoria na eficiência e na disponibilidade de novos campos;
- Queda nos custos de operação e manutenção.

⁹ Seção 4.1.4.

Os custos totais de um projeto de energia eólica variam entre 15 a 40% de acréscimo ao custo do aerogerador e dependem também do número de aerogeradores instalados, sua potência e as características do local da instalação. Além disso, fatores institucionais de cada país são contabilizados neste balanço. Os componentes do custo final de um projeto em energia eólica podem ser visto na Tab. 2.3 em valores médios de projetos instalados na Europa.

Tabela 2.3 – Balanço do custo de projetos em energia eólica na Europa

Item	Faixa de Custo (% do preço do aerogerador)
Fundação	5 – 11
Conexão elétrica	5 – 11
Compra do terreno	0 – 5,7
Custos de planejamento	1,5 – 3
Aprovação de projeto	3 – 8
Infra-estrutura	2 – 4
Gerência	3 – 6
Diversos	2 – 4
Conexão à rede	7,5 – 15
TOTAL	15 – 40

Fonte: WEA (2000a).

Já para a instalação das fazendas eólicas, os custos variam de acordo com a Tab. 2.4.

Tabela 2.4 – Balanço do custo para instalação das fazendas eólicas

Custo	%
Aerogerador	70
Engenharia e direção	6
Sistema elétrico	12
Obra civil	12
Total	100

Fonte: EWEA (2000c).

Durante a vida útil do equipamento, existem ainda os custos de operação e manutenção, que podem ser subdivididos conforme a Tab. 2.5.

Tabela 2.5 – Balanço do custo durante a vida útil das fazendas eólicas

Tipo de custo	%
Operação e manutenção	78
Gestão e administração	11
Terreno (concessão, aluguel)	11
Total	100

Fonte: EWEA (2000c).

De uma forma geral, existe uma tendência de que os custos por kW diminuam à medida que os sistemas eólicos aumentem de tamanho e sua tecnologia seja desenvolvida (EWEA, 2000c). A evolução nos preços das turbinas eólicas de pequeno porte com relação ao seu tamanho e sua potência no início da década de noventa pode ser vista na Fig. 2.2.

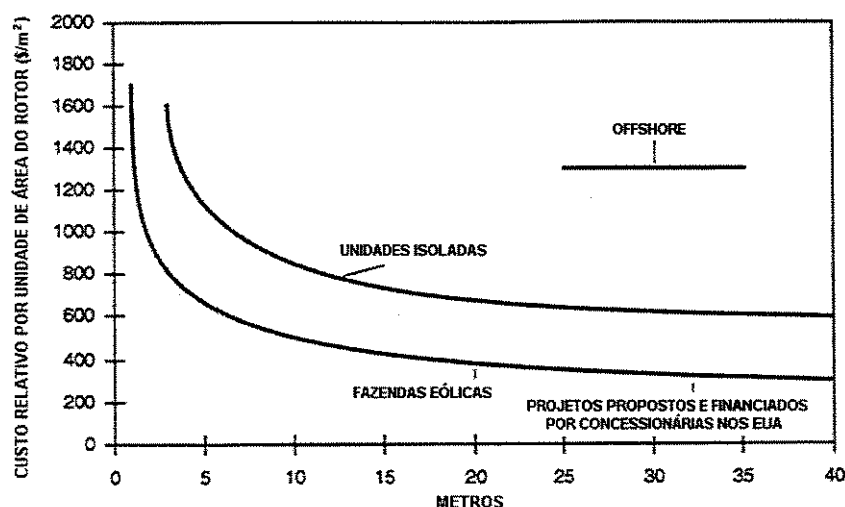


Figura 2.2 – Custo relativo de turbinas de pequeno porte (até 50 kW).

Fonte: Gipe (1995).

A aplicação da tecnologia atual para a instalação de grandes parques eólicos em diversos países mostrou-se técnica e economicamente mais viável, além de apresentar a vantagem de reduzir as influências das flutuações na energia gerada, obtendo um rápido desenvolvimento devido à velocidade de realimentação dos dados sobre o funcionamento. Vale ressaltar que nos Estados Unidos e Europa, em 1995, a produção em larga escala já estava resultando num custo de cerca de 1.000 até 600 US\$/kW instalados, compatível com os custos de uma hidrelétrica (Coimbra, 1999).

O desenvolvimento tecnológico aplicado aos materiais utilizados, o desenvolvimento dos perfis aerodinâmicos das pás e as técnicas de controle eletrônico para melhor aproveitamento do vento estão levando a uma permanente redução dos custos da eletricidade gerada a partir da energia eólica. Para exemplificar, em 1980 gastava-se, em média, US\$ 180,00 para gerar 1 MWh de energia a partir dos ventos. Atualmente, a AWEA já considera a geração eólica competitiva, em áreas com um regime de vento superior a 6,7 m/s (Tab. 2.6), onde o seu custo estaria na faixa de 40,00 a 50,00 US\$/MWh (Pereira, 1998).

De acordo com o WEA (2000b), a evolução dos preços e as projeções para o futuro podem ser observados na Fig. 2.3, verificando que a partir de 2017 tem-se um custo estimado de 32 US\$/MWh.

Tabela 2.6 – Viabilidade da energia eólica em relação à velocidade do vento

Velocidade média anual (medições a 10 m acima do nível do solo)	Possibilidades de uso para a energia eólica
Abaixo de 3 m/s	Usualmente não viável, a menos em ocasiões especiais
3-4 m/s	Pode ser uma opção para bombas eólicas, improvável para geradores eólicos
4-5 m/s	Bombas eólicas podem ser competitivas com bombas à Diesel. Pode ser viável para geradores eólicos isolados
Mais que 5 m/s	Viável tanto para bombas eólicas quanto para geradores eólicos isolados.
Mais que 7 m/s	Viável para bombas eólicas, geradores eólicos isolados e conectados à rede.

Fonte: Pereira (1998)

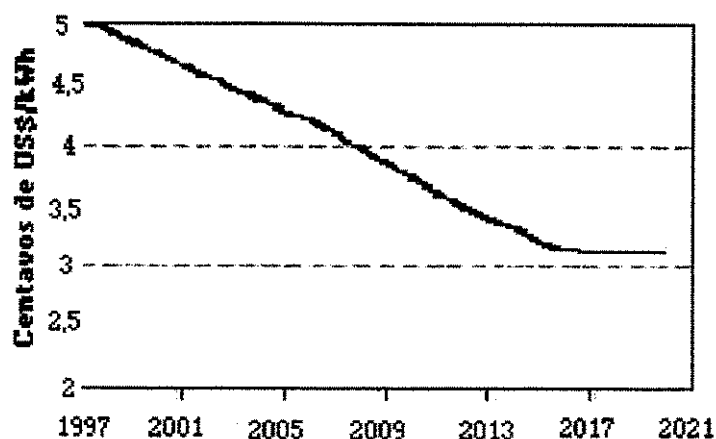


Figura 2.3 – Redução potencial dos custos para a energia eólica.

Fonte: WEA (2000b).

O custo da energia produzida pelos ventos varia em função da velocidade do vento. Uma vez que a potência extraída de uma turbina é diretamente proporcional ao cubo da velocidade¹⁰, qualquer variação da velocidade do vento acarreta significativas variações na potência entregue pela turbina.

¹⁰ Seção 4.1.1.

A energia eólica já se mostra competitiva com a geração nuclear de energia elétrica mesmo não se contabilizando os custos de externalidade envolvidos. Muitas vezes o preço da geração nuclear exclui custos externos como o de riscos de acidentes que, por exemplo, são freqüentemente sustentados pelo governo, aliviando as concessionárias do pagamento de seguros (EWEA, 1998).

Fontes convencionais de geração de eletricidade ainda apresentam subsídios significativos em alguns locais, porém a pressão da sociedade por fontes que apresentem baixos impactos ambientais, força a contabilização dos custos de externalidade de cada fonte, tornando os custos da energia eólica mais competitivos.

Não existindo um valor fixo do custo da energia para cada fonte específica, dada a grande variedade de fatores que influenciam os valores finais de investimentos, um fator de análise dos custos da energia eólica está na comparação com preços de outras fontes de energia. Na Tab. 2.7 pode-se verificar os custos de geração de eletricidade para as diferentes fontes renováveis de energia.

Tabela 2.7 – Custos de geração de eletricidade para fontes renováveis de energia.

Fonte Renovável	Custos de geração (US\$/MWh)
Biomassa	50-150
Ventos	50-130
Solar (fotovoltaica)	250-1250
Solar (térmica)	120-180
Hidroeleticidade	20-80
Energia das marés	80-180

Fonte: WEA (2000b).

O custo unitário da energia eólica tem-se reduzido drasticamente com a queda do custo dos componentes e de fabricação. Uma avaliação dos aerogeradores instalados na Dinamarca, realizada pelo *National Research Laboratory*, em 1995, observou que os custos tinham caído de 169 US\$/MWh em 1981 para 61,5 US\$/MWh em 1995 – uma redução de dois terços (Fig. 2.4). Quando esses cálculos foram realizados, as máquinas de 500 kW ainda não estavam

integralmente fixadas no comércio e foram posteriormente ampliadas para as versões de 600 kW e 750 kW. O resultado é que o preço unitário da geração é, em alguns casos na Europa, de 46 US\$/MWh (WEA, 2000b).

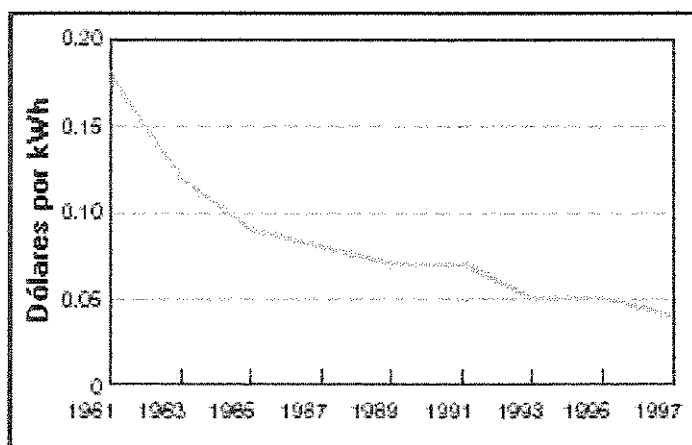


Figura 2.4 – Redução dos custos de geração de eletricidade eólica na Dinamarca.

Fonte: WEA (2000b).

Com o desenvolvimento tecnológico espera-se uma redução de custos ainda maior, com a utilização de materiais alternativos e mais resistentes diminuindo assim, além dos custos da própria turbina, os custos em manutenção preventiva.

2.1.3. Estado da Arte no Mundo

A BTM Consult mostra que a tecnologia eólica é uma das tecnologias que mais cresce no mundo, conforme verificado na Tab. 2.8. Entre os anos de 1995 e 1999, a potência média instalada anualmente cresceu a uma taxa média superior a 40% ao ano, enquanto que a potência acumulada no mesmo período cresceu 32% a.a., atingindo uma produção de 20TWh de eletricidade em 1999 (Fig. 2.5).

Tabela 2.8 – Taxas de crescimento do mercado mundial entre 1994 e 1999

Ano	Potência Instalada (MW)	Crescimento (%)	Potência Acumulada (MW)	Crescimento (%)
1994	730		3.488	
1995	1.290	77%	4.778	37%
1996	1.292	0,2%	6.070	27%
1997	1.568	21%	7.636	26%
1998	2.597	66%	10.153	33%
1999	3.922	51%	13.932	37%
Média em 5 anos		40%		32%

Fonte: BTM Consult (2000).

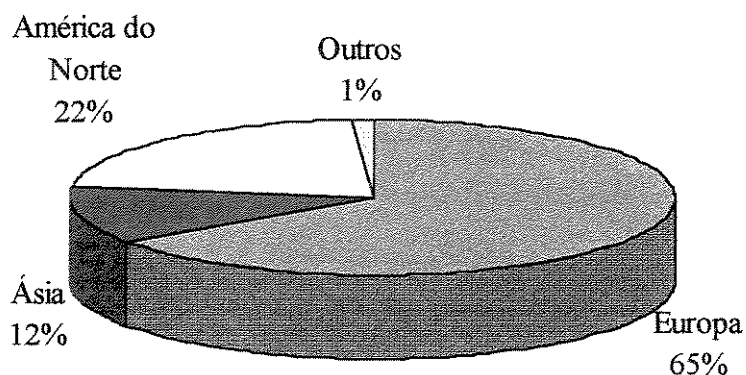


Figura 2.5 - Geração de Eletricidade Eólica Mundial - 20TWh (1999).

Fonte: Gipe (2000).

A utilização da energia eólica em todo o mundo apresentou um crescimento exponencial (Fig. 2.6 e Fig. 2.7), destacando-se o mercado espanhol, com taxa de crescimento da potência instalada, nos últimos três anos, de 93%, superando a capacidade instalada do tradicional mercado dinamarquês, alcançando, no final de 1999, um total de 1.812 MW de potência instalada (Tab. 2.9).

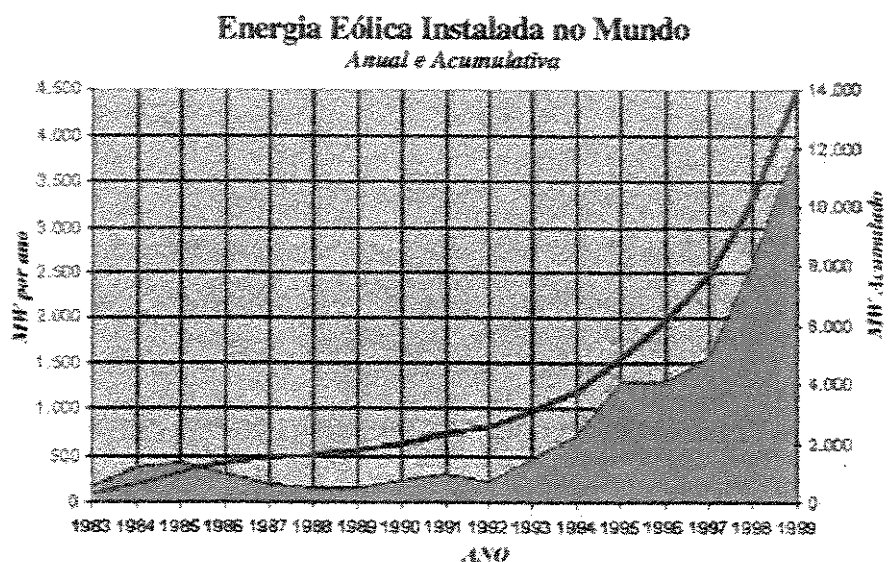


Figura 2.6 – Potência eólica instalada no mundo.

Fonte: BTM Consult (2000).

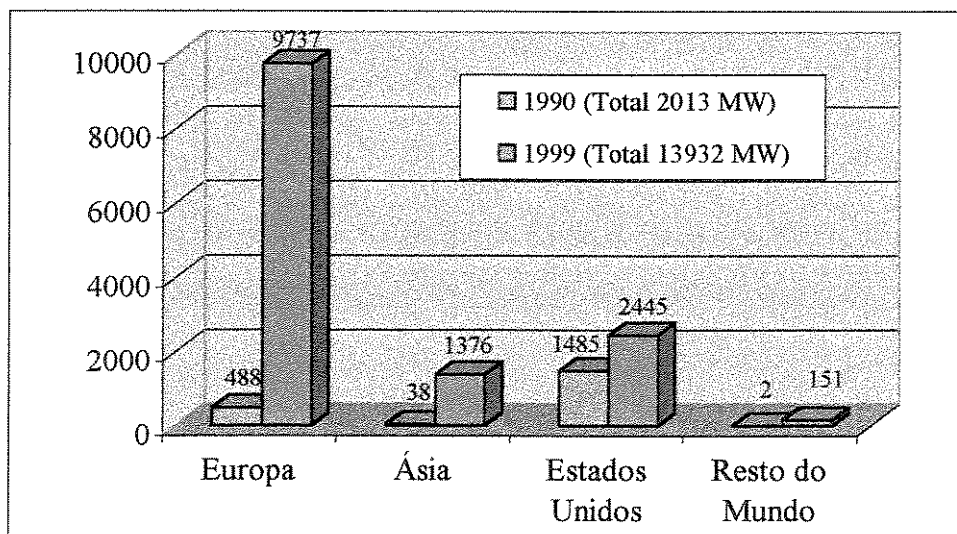


Figura 2.7 – Capacidade instalada de energia eólica no mundo em 1990 e 1999 (MW).

Fonte: BTM Consult (2000).

Tabela 2.9 – Taxa de crescimento dos dez maiores mercados de Energia Eólica.

País	Potência acumulada ao final do ano (MW)					Taxa de Cresc. 1998-1999 (%)	Média de três anos (%)
	1995	1996	1997	1998	1999		
Alemanha	1.132	1.552	2.081	2.874	4.442	54,6%	42,0%
Estados Unidos	1.614	1.615	1.611	2.141	2.445	14,2%	14,8%
Espanha	133	250	512	880	1.812	105,9%	93,5%
Dinamarca	637	835	1.116	1.420	1.738	22,4%	27,7%
Índia	576	820	940	992	1.035	4,3%	8,1%
Países Baixos	249	295	329	379	433	14,2%	13,6%
Reino Unido	200	273	328	338	362	7,1%	9,9%
Itália	33	71	103	197	277	40,5%	57,5%
China	44	79	146	200	262	31,1%	49,1%
Suécia	69	103	122	176	220	25,1%	28,7%
Total	4.687	5.893	7.288	9.567	13.026	35,7%	30,3%

Fonte: BTM Consult (2000).

Este crescimento indica uma perspectiva promissora para as próximas décadas, com os países encontrando na energia eólica um importante complemento da geração de energia elétrica de forma limpa e ecologicamente correta.

2.2. A Energia Eólica no Brasil

A principal utilização de energia eólica no Brasil destinava-se ao bombeamento de água, muitas vezes de forma isolada e em pequenas escalas com vários trabalhos e pesquisas científicas realizadas nas décadas de 70 e 80. Porém, a geração de energia elétrica a partir de turbinas eólicas no Brasil teve início apenas em julho de 1992, com a instalação de uma turbina de 75 kW na ilha de Fernando de Noronha. Hoje, mesmo que ainda incipiente no Brasil, a tecnologia eólica de pequeno porte, para geração elétrica doméstica, tem crescido principalmente nas comunidades isoladas que ainda não são atendidas pela rede elétrica convencional, devido à forte disseminação

da tecnologia, melhoria das máquinas, custos decrescentes de investimentos e, em particular, pela procura por fontes energéticas mais limpas, com baixos impactos ambientais.

Existem vários projetos pilotos em funcionamento e algumas plantas comerciais conectadas à rede elétrica, sendo que os principais projetos, tanto em energia eólica quanto em solar, estão presentes principalmente na Região Nordeste e Norte, como forma de geração descentralizada de energia elétrica, como será mostrado adiante.

Os primeiros estudos voltados para o desenvolvimento de tecnologia nacional datam de 1976, nos laboratórios do Centro Técnico Aeroespacial – CTA. Inicialmente, foram desenvolvidos vários protótipos de aerogeradores de pequena potência (1 a 2 kW) o que incentivou uma das primeiras avaliações do potencial eólico para a geração de energia elétrica na costa do Nordeste. O projeto tomou uma grande proporção quando o Centro Aeroespacial da Alemanha – DFVLR firmou parcerias com o CTA para execução do projeto DEBRA que consistiria em um aerogerador de 100 kW com rotor de 25 metros de diâmetro. Coube ao CTA a montagem das pás que, em 1983, estavam prontas e embarcadas para a Alemanha (CHESF-BRASCEP, 1997).

A grande dimensão territorial do país dificulta a eletrificação das áreas rurais, encarecendo as linhas de transmissão e, a utilização de derivados de petróleo em comunidades isoladas torna-se muitas vezes antieconômica devido às dificuldades e ao custo elevado do transporte de combustível. Entre as aplicações da energia eólica, certamente aquelas voltadas para o meio rural ganham um importante destaque para a utilização no Brasil. Mesmo com velocidades relativamente baixas em algumas áreas, as aplicações de baixa potência encontradas no meio rural ainda assim podem ser encorajadas (Hirata, 1990).

O novo cenário de privatizações do setor elétrico provocou a formação de novos paradigmas para o desenvolvimento das fontes alternativas no Brasil, com a necessidade de conhecimento do potencial das energias renováveis visando baixo impacto ambiental e rápida implementação, com o objetivo de se conseguir novos meios para a efetiva participação na matriz energética nacional.

2.2.1. As primeiras metas para o desenvolvimento da energia eólica no Brasil

A base da política nacional para o desenvolvimento caracterizou-se com o “I Encontro para Definição de Diretrizes para o Desenvolvimento de Energias Solar e Eólica no Brasil”, realizado pelo MME e o MCT em Abril de 1994, em Belo Horizonte/MG.

Foram criados vários grupos de discussão que debateram as potencialidades e os desafios ao desenvolvimento de sistemas solares e eólicos no Brasil. Foram elaboradas metas e diretrizes apreciadas e aprovadas por maioria, em reunião plenária com 120 participantes de 79 entidades formando assim a Declaração de Belo Horizonte (CRESESB, 1996).

Dentre as diretrizes para o desenvolvimento solar e eólico, naquele evento estabeleceram-se metas ousadas para a implantação de novas tecnologias até o ano de 2005, ou seja, para um horizonte de dez anos a partir do Encontro. O alvo de disseminação da tecnologia no Brasil foi estipulado como citado no relatório final do Encontro, a Declaração de Belo Horizonte (Dutra, 2001):

“(...) As referidas diretrizes estabelecem linhas de ação e propõem medidas específicas para criar condições favoráveis ao desenvolvimento das fontes de energia solar e eólica no Brasil e possibilitar a realização das metas propostas para o ano 2005: instalação de 1.000 MW (Mega Watts) de geração eólica, 50 MW de geração fotovoltaica e 3 milhões de metros quadrados de geração termo-solar. Estas metas foram projetadas a partir do dimensionamento de oportunidades de aplicações nas áreas de energia, integração regional, bem estar social, forças armadas, telecomunicações, transporte, agricultura, educação e saúde”.

Para tanto, foram elaboradas linhas de ação de nível político, legislativo e administrativo, além de metas para o aperfeiçoamento tecnológico, formas de financiamento, formação de recursos humanos e divulgação das tecnologias solar e eólica.

O “II Encontro para o Desenvolvimento de Energias Solar e Eólica” que se realizou em Brasília, em março de 1995, contou com uma grande exposição tecnológica instalada no gramado da Esplanada dos Ministérios apresentando várias tecnologias alternativas na geração de energia

elétrica (biomassa, sistema solar térmico, sistema solar fotovoltaico, células combustíveis, energia eólica, entre outros), além das diversas possibilidades de aplicações.

O “III Encontro para o Desenvolvimento de Energias Renováveis”, realizado em Junho de 1996, na cidade de São Paulo, também contou com uma exposição temática sobre fontes alternativas para demonstração ao público em geral, tendo como principal objetivo a apresentação do Plano Nacional de Ação para o Desenvolvimento de Energias Renováveis. Além de energias solar, eólica e biomassa, o escopo do Plano foi expandido de forma a contemplar as pequenas centrais hidrelétricas - PCH (com menos de 30 MW de capacidade instalada)¹¹.

Durante este Encontro foi prevista a realização de oito grandes projetos nacionais envolvendo energia eólica, com necessidade de recursos de cerca de R\$ 150 milhões¹² (ANEEL, 1998), distribuídos em projetos abordando os seguintes programas:

- Programa Nacional para Levantamento Eólico – Atlas Eólico do Brasil, recursos de R\$ 6,5 milhões;
- Geração de eletricidade através de sistemas híbridos eólico/diesel de grande porte em regiões isoladas do Brasil (ilhas e vilas), recursos necessários de R\$ 60 milhões;
- Aplicações produtivas de bombeamento e dessalinização d’água, recursos na ordem de R\$ 23 milhões para a instalação de 300 sistemas;
- Sistemas híbridos eólico/solar para eletrificação rural, R\$ 19,6 milhões;
- Desenvolvimento de turbinas eólicas adaptadas às condições de vento do Brasil, R\$ 25 milhões;
- Desenvolvimento de programas computacionais e instrumentação aplicados a projetos de sistemas e componentes, R\$ 2,5 milhões;
- Implantação de centros/laboratórios para desenvolvimento, testes e normatização de turbinas eólicas e seus componentes, R\$ 12 milhões;
- Incentivo à educação e divulgação, R\$ 2,5 milhões.

¹¹ O objetivo do Plano Nacional na inclusão de PCHs é o de alcançar uma capacidade total instalada de 2.500 MW até 2005 (CRESEB, 1996).

¹² Valores referentes a 1996 por ocasião da elaboração do documento.

A manutenção dos grupos de trabalho é importante para o desenvolvimento das fontes alternativas de energia, objetivando o aumento da participação das mesmas nos seus diversos ramos e aplicações.

2.2.2. O estado da arte da energia eólica no Brasil

As principais aplicações de energia eólica, no Brasil (Tab. 2.10 e Fig. 2.8), estão na Região Nordeste, sendo que muitas instituições empenharam-se no mapeamento eólico e é uma importante opção para novos investimentos em geração de energia elétrica. Estudos realizados pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF e pela Companhia Elétrica do Ceará - COELCE mostram que a costa nordestina entre o Rio Grande do Norte e o Ceará apresenta um recurso eólico estimado em 12.000 MW (CHESF-COELCE, 1996).

Tabela 2.10 – Estado atual das aplicações eólicas no Brasil.

Instalação	Implementação	Financiadores	Potência	Início de Operação
Projetos em Operação				
Fernando de Noronha – PE	CELPE, UFPE/Folkcenter	30% Dinamarca	75 kW	1992
Fernando de Noronha – PE	CELPE, UFPE, ANEEL	ANEEL	225 kW	1992
Morro do Camelinho – MG	CEMIG	70% Alemanha	1 MW	1994
Porto de Mucuri – CE	COELCE	70% Alemanha	1,2 MW	1996
Sist. Híbrido de Joanes – PA	CEPEL/CELPA	100% EUA	40 kW	1997
Central Eólica de Prainha – CE	Wobben Windpower/ COELCE	Privado	10 MW	1999
Central Eólica de Taíba – CE	Wobben Windpower /COELCE	Privado	5 MW	1999
Usina de Palmas – PR	Wobben Windpower/COPEL	Privado	2,5 MW	1999
Projetos em Negociação				
Central Eólica – CE	Cinsel/COELCE	Privado	5,4 MW	1999
2º Fase – Palmas - PR	Wobben Windpower/COPEL	Privado	9,5 MW	
Paracuru – CE	Governo do Ceará/COELCE	100% Japonês		2000
Camocim – CE	Governo do Ceará/COELCE	100% Japonês		2002
Estudo de Viabilidade/Pré-Concessão				
Barreirinha	C.E.X. Clean Energy do Brasil		30 MW	1998
Fortaleza	C.E.X. Clean Energy do Brasil		60 MW	1998
Estudos Preliminares/ Planejamento				
Jericoacara - CE	COELCE		100 MW	
Cabo Frio - RJ	UFF		10 MW	
Norte Fluminense - RJ	UFF		40 MW	
Pernambuco, R. G. do Norte	UFPE/Consórcio de Fabricantes		30 MW	
3º Fase – Palmas - PR			75 MW	
Minas Gerais			150 MW	
Salinópolis - PA			50 MW	

Fonte: Dutra (2001); WINROCK (1999); ELETROBRÁS (2000).

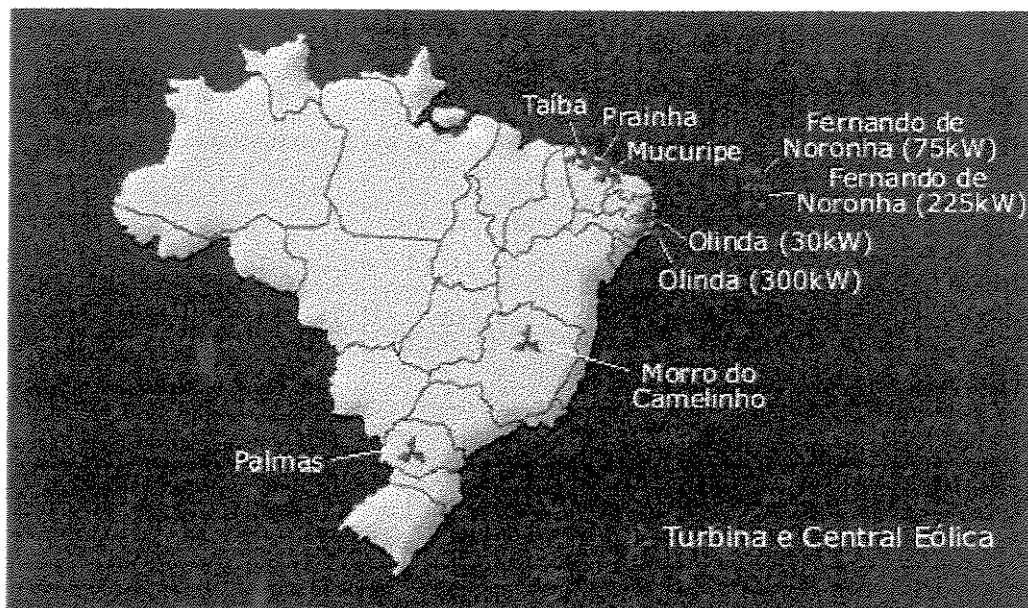


Figura 2.8 - Principais projetos de energia eólica no Brasil

Fonte: Eólica (2000)

A construção de fazendas eólicas na Região Nordeste tem sido facilitada pelas seguintes razões:

- Custos decrescentes de geração uma vez que a tecnologia tem evoluído cada vez mais nos últimos anos;
- A nova legislação do Produtor Independente de Energia;
- A importância da energia eólica na redução da dependência de combustíveis fósseis principalmente na Região Norte onde o combustível fóssil é imprescindível;
- A cobertura na legislação para o acesso aberto na rede de distribuição e transmissão.
- Velocidades de vento superiores a 6 m/s (medições a 10 metros de altura)¹³.

2.2.3. Perspectivas da energia eólica no Brasil

Existem vários projetos significativos (Tab. 2.10) e estudam-se vários locais para o aproveitamento eólico. Assim, a energia eólica apresenta-se como uma fonte de energia renovável promissora para a matriz energética brasileira.

¹³ Ver o Apêndice 3.

A energia eólica terá seu parque aumentado até 2005, pois a ANEEL autorizou a construção de quarenta e três novas usinas eólicas¹⁴. Com estas usinas, o total de geração de energia eólica no país, até 2005, será de 3.680 MW (ANEEL, 2001b).

No primeiro lote de usinas, foi autorizada a construção de 20 novas usinas eólicas que, juntas, terão capacidade de geração de 1.773 MW. A maior parte dos empreendimentos, 18, será construída na região Nordeste, nos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Pernambuco e Bahia; as duas outras serão construídas no estado do Rio de Janeiro (ANEEL, 2001b).

O segundo lote conta com vinte e três novas usinas, sendo que as plantas geradoras agregarão 1.907 MW ao parque gerador brasileiro. O Nordeste receberá todos os empreendimentos, com oito usinas localizadas no Ceará, outras oito no Rio Grande do Norte, cinco em Pernambuco e duas na Bahia. Os parques eólicos devem entrar em operação entre julho de 2002 e dezembro de 2005. O investimento previsto para a construção das 23 usinas é de R\$ 4,7 bilhões (ANEEL, 2001b).

Um grande avanço nas normas de regulamentação propostas pela ANEEL está na Resolução n.º 233, de 29 de julho de 1999, que estabelece os Valores Normativos, ou preços de referência, que limitam o repasse, para as tarifas de fornecimento, dos preços livremente negociados na aquisição de energia elétrica por parte dos concessionários e permissionários.

Projetos americanos com cooperação do NREL demonstram um interesse no mercado brasileiro para as fontes alternativas de energia e a presença da Wobben Wind Power¹⁵, subsidiária da Enercon GhB no Brasil, mostra as perspectivas de expansão do mercado eólico da América do Sul (Dutra, 2001).

A *Carl Duisberg Gesellschaft* – CDG, Fundação Internacional de Treinamento e Desenvolvimento da Alemanha vem desenvolvendo um planejamento para divulgação da energia eólica na Argentina e no Brasil, apresentando o treinamento necessário para a disseminação, divulgação e implementação da tecnologia eólica para geração de energia elétrica, identificando

¹⁴ O Apêndice 4 apresenta as novas usinas.

¹⁵ A Wobben Windpower inaugurará, no final de janeiro de 2002, sua nova fábrica de equipamentos eólicos no Ceará, no porto de Pecem, com o objetivo de alavancar a produção de projetos eólicos no país (Canalenergia, 2002).

os parceiros que facilitariam o desenvolvimento de atividades abordando as várias linhas de estudos da energia eólica em cada país (CRESESB, 1999).

A agenda de atividades da CDG no Brasil e na Argentina prevê vários cursos e seminários voltados exclusivamente para energia eólica até 2002 firmando o compromisso entre o CEPEL e o Laboratório de Mecânica da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ para a implementação de um Laboratório de Calibração de Anemômetros destinado à aferição e ajustes dos anemômetros instalados no Brasil e na Argentina, demonstrando o interesse alemão pelo mercado brasileiro.

Com uma política mais efetiva para o desenvolvimento de fontes alternativas e renováveis de energia e uma melhor definição das regras de comercialização, é favorecido o desenvolvimento e se possibilita novos investimentos em energia eólica.

Com a crescente preocupação com relação às questões ambientais, objetivando baixos impactos ambientais no contexto da geração e distribuição de energia no Brasil, a energia eólica é uma opção interessante, com alguns projetos pilotos mostrando resultados satisfatórios. As novas centrais geradoras autorizadas garantirão, portanto, aumento significativo da presença da geração por fontes alternativas na matriz energética brasileira.

A crise de suprimento energético que ocorreu no Brasil impulsionou os projetos novos de geração de energia elétrica (fazendas eólicas, termelétricas), com a criação de novos incentivos, além de reajuste na tarifa de energia elétrica. Com isso o governo procurando incentivar a energia eólica, criou o Programa Emergencial de Energia Eólica - PROEÓLICA no território nacional¹⁶. A questão ambiental é considerada na maior facilidade de aprovação dos EIA-RIMA (Estudo de Impactos Ambientais e Relatório de Impactos Ambientais) para as fazendas eólicas, em contraste com as termelétricas.

¹⁶ Ver Apêndice 2.

2.3. Aplicação dos sistemas eólicos

Nos sistemas de geração de eletricidade a partir dos ventos, o componente principal é o aerogerador, responsável pela conversão do movimento das massas de ar (ventos), que possuem energia cinética, em eletricidade.

É importante verificar a finalidade desta eletricidade gerada por sistemas eólicos, pois se deve determinar a necessidade de utilização de outros equipamentos responsáveis pelo armazenamento, controle e regulação.

De acordo com as especificações do aerogerador, a eletricidade gerada pelos sistemas eólicos pode ser em corrente contínua ou em corrente alternada, utilizando-se de três aplicações distintas: sistemas isolados (*Stand Alone System*), sistemas híbridos e sistemas interligados à rede (*Grid Connected*). Os sistemas obedecem a uma configuração básica, necessitam de uma unidade de controle de potência e, em determinados casos, de uma unidade de armazenamento.

2.3.1. Sistemas interligados à rede

Geralmente são sistemas de grande porte, que utilizam um grande número de aerogeradores e dispensam sistemas de armazenamento de energia pois toda a geração é entregue diretamente à rede elétrica. Estes sistemas são, atualmente, bastante viáveis, devido à sua rápida evolução e representam uma fonte complementar ao sistema elétrico ao qual estão interligados. Todo o arranjo, para ser conectado à rede, deve satisfazer às exigências de qualidade e segurança (adequar valores de tensão e frequência) para permitir que a energia gerada seja lançada diretamente na rede, sem afetá-la.

2.3.2. Sistemas Isolados

São os sistemas não interligados à rede de energia, denominados também de autônomos e tornam-se bastante dispendiosos devido às complicações dos sistemas de armazenamento, que devem compensar não só as variações instantâneas e diárias, mas também compensar a variação da disponibilidade nos períodos do ano, sendo sua aplicação limitada a pequenos sistemas para recarga de baterias, em regiões remotas, principalmente para fornecimento de eletricidade para equipamentos de comunicação e eletrodomésticos, onde o benefício e conforto compensam o alto

custo por watt obtido. A eletricidade pode ser diretamente utilizada por equipamentos de corrente contínua e o excedente é normalmente armazenado em bancos de baterias, monitorados por um controlador de carga, que evita a sobrecarga e descarga excessiva dos mesmos. Para alimentação de equipamentos que operam com corrente alternada (CA) é necessário a utilização de um inversor (seção 2.4.7), recomendado quando se deseja mais conforto com a utilização de eletrodomésticos convencionais.

2.3.3. Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são aqueles que, desconectados da rede convencional, apresentam várias fontes de geração de energia em conjunto, como por exemplo, turbinas eólicas, geração diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. A utilização de várias formas de geração de energia elétrica aumenta a complexidade do sistema e exige a otimização do uso de cada uma das fontes. Nesses casos, é necessário realizar um controle de todas as fontes para que haja máxima eficiência na entrega da energia para o usuário.

Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio a grande porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor. Devido à grande complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, a forma de otimização do sistema torna-se um estudo particular a cada caso¹⁷.

2.4. Componentes do sistema de geração eólica

O aerogerador, ou turbina eólica, é uma máquina que absorve parte da potência cinética do vento através de um rotor aerodinâmico, convertendo em potência mecânica de eixo (torque x rotação), a qual é convertida em potência elétrica (tensão x corrente) através de um gerador elétrico. A primeira etapa de conversão de energia que aparece em um sistema eólico é o rotor, que em máquinas de eixo horizontal está constituído por um número de pás que, através de efeitos aerodinâmicos, converte a energia cinética, presente nos ventos, em energia mecânica de

¹⁷ Para sistemas híbridos eólico/diesel, os geradores eólicos podem representar fator de economia de combustível com custos bem atraentes para locais onde não dispõe da rede de distribuição interligada e dependam de geradores a diesel para fornecimento de energia elétrica. Como o motor diesel garante a regularidade e estabilidade no fornecimento de energia, dispensando sistemas de armazenamento, e o transporte do diesel representa um custo adicional, a implementação de aerogeradores é, neste caso, bastante compensador e recomendado.

rotação, a uma frequência que varia entre 5 e 15 rpm (para pequenos sistemas de bombeamento) até 200 ou 300 rpm, para aerogeradores.

Um aerogerador leva incorporado, geralmente, um sistema multiplicador de velocidades¹⁸ (caixa multiplicadora) para entregar a energia mecânica ao gerador elétrico a uma frequência da ordem de 1000 a 1500 rpm, com um rendimento muito elevado (da ordem de 90%). Em muitos casos, a caixa multiplicadora vem sendo substituída por componentes eletrônicos de potência, que adequam a frequência do rotor para ser entregue ao gerador.

O gerador elétrico¹⁹, por sua vez, transforma a energia mecânica de rotação em energia elétrica utilizável, com um rendimento também alto (da mesma ordem ao da caixa multiplicadora). Se o aerogerador trabalha conectado à rede elétrica, será necessário também um transformador para elevar a tensão de saída, compatibilizando-a com a da rede.

Para a captação de uma maior quantidade de energia pelas pás, o sistema captor/conversor deverá estar apoiado em uma torre a uma altura do nível do solo²⁰, que varia em função do diâmetro do rotor.

Em síntese, os diferentes elementos que compõem um sistema eólico (Fig. 2.9 e Fig. 2.10) devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

- Suportes: responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema de captação: responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- Sistema de orientação: responsável pela orientação do rotor.
- Sistema de regulação: responsável pelo controle de velocidade.
- Sistema de transmissão: responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até o eixo do gerador.

¹⁸ Seção 2.4.5

¹⁹ Seção 2.4.6

²⁰ Em maiores alturas a velocidade do vento tende a ser maior, aumentando a quantidade de energia produzida (seção 4.1.4).

- Sistema de geração: responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Acessórios: sistemas de armazenamento, inversor, controlador de carga.

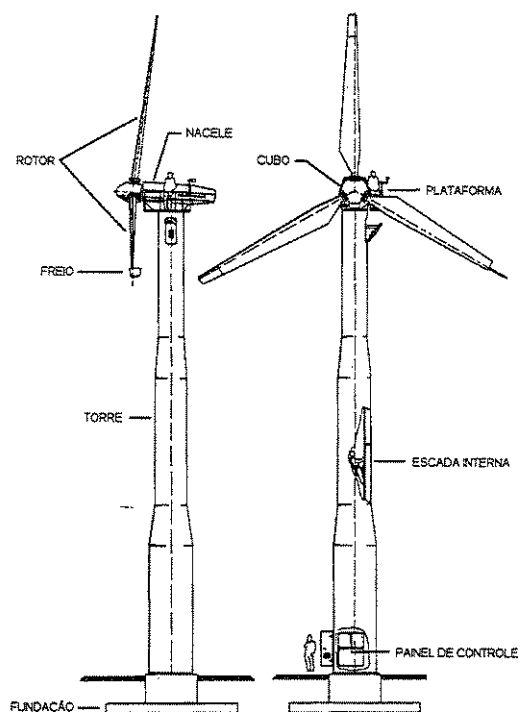


Figura 2.9 – Componentes de um sistema eólico

Fonte: Gipe (1995)

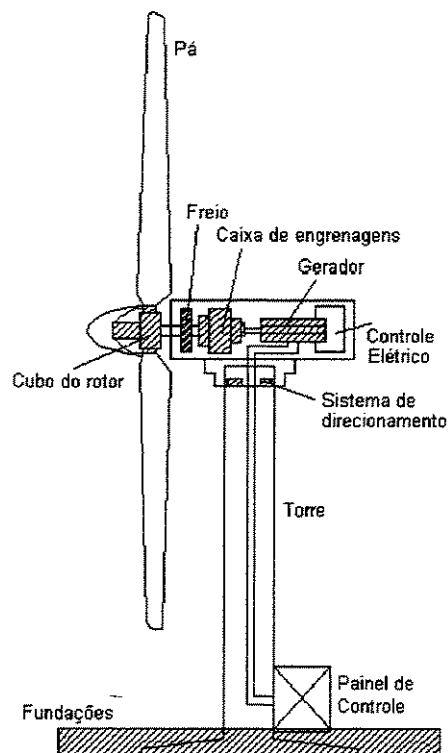


Figura 2.10 – Aerogerador em corte

Fonte: Gipe (1993)

2.4.1. Suportes

Os aerogeradores devem estar posicionados sobre um suporte que deve ser capaz de suportar o empuxo de vento que o sistema de captação transmite e as eventuais vibrações que possam ocorrer. Sua altura deve ser suficiente para evitar que as turbulências que provêm do solo afetem a máquina e superar todos os obstáculos próximos, que podem perturbar o vento. Os suportes de um sistema de geração eólico são a torre e a fundação.

As torres, que elevam os rotores à altura desejada, estão sujeitas à inúmeros esforços. Primeiramente, forças horizontais devem ser levadas em conta: resistência do rotor e da própria torre à força do vento. Em seguida, forças torsionais, impostas pelo mecanismo de controle de rotação e esforços verticais (peso do próprio equipamento), não devem ser desprezadas.

Quanto ao material, as torres podem ser de aço (em treliças ou tubulares), ou tubulares de concreto. Para aerogeradores menores, é possível a utilização de torres de madeira sobre um poste de eucalipto com estais de aço.

A torre suporta a massa da nacele²¹ e das pás; estas, em rotação, excitam cargas cíclicas no conjunto, com a frequência da rotação e seus múltiplos. Assim, uma questão fundamental no projeto da torre é determinar todas as frequências naturais de vibração dos componentes, em especial pás e torre, para evitar ressonância com as frequências de excitação do rotor em operação. A ressonância causa aumento das amplitudes de carregamento cíclico no sistema, comprometendo a resistência à fadiga²² e reduzindo a vida útil prevista para o aerogerador, que é de aproximadamente 20 anos. Logo após 1973, a primeira geração de aerogeradores, dito modernos, foi projetada com torres rígidas, com frequências naturais bem acima das forças de rotação do rotor. Entretanto, esse enfoque conduziu a torres desnecessariamente pesadas e caras (Gipe, 1995).

Durante a última década, à medida que a compreensão dos problemas dinâmicos de aerogeradores foi aumentando, tornou-se possível a construção de aerogeradores mais leves, que são conseqüentemente menos rígidos e também significativamente mais baratos que seus antecessores.

Desde que tenham as suas frequências naturais desacopladas das da excitação do rotor, as torres podem ser estaiadas ou não. De modo geral, as frequências naturais de uma torre estaiada podem ser melhor reguladas variando-se a tensão de estaiamento. Interessante notar que um estaiamento por barras de aço é preferível ao uso de cabos, pois estes são mais elásticos e necessitam de pré-tensões muito maiores do que as que seriam necessárias em barras para atingir a mesma frequência natural, numa mesma configuração (Milligan *et al*, 1998).

²¹ Compartimento fixado na parte mais alta da torre onde o gerador elétrico e suas conexões entre a caixa de engrenagem e o eixo das pás são protegidos. A nacele também abriga o sistema de controle que conta com sensores de velocidade e direção do vento em sua parte externa.

²² Perda de elasticidade de um material ou diminuição de sensibilidade de aparelhos, máquinas, etc.

2.4.2. Sistemas de captação

O rotor, elemento principal de um aerogerador, é composto por um determinado número de pás e um cubo²³ e sua função é transformar a energia cinética contida nos ventos em energia mecânica utilizável. Existe uma grande variedade de rotores e sua classificação mais usual é feita em função da disposição de seu eixo, obtendo-se assim aerogeradores de eixo horizontal ou vertical.

Eixo Horizontal

Esta disposição necessita de um mecanismo que permita o posicionamento do eixo do rotor em relação a direção do vento, para um melhor aproveitamento global, principalmente onde se tenha muita mudança na direção dos ventos. Encontram-se ainda moinhos de vento seculares com direcionamento do eixo das pás fixo, mas situam-se onde os ventos predominantes são bastante representativos e foram instalados em épocas em que os citados mecanismos de direcionamento ainda não haviam sido concebidos.

Os principais modelos diferem quanto às características que definem o uso mais indicado, sendo eles:

- Rotor multipás - atualmente representa a maioria das instalações eólicas para o bombeamento d'água. Suas características tornam este uso mais próprio, pois mesmo para ventos com velocidades baixas, conseguem extrair energia dos mesmos. Porém, este tipo é pouco indicado para geração de energia elétrica.
- Rotor de três ou duas pás - é praticamente o padrão de rotores utilizados nos aerogeradores modernos. Isto se deve ao fato da grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor, muito superior ao rotor multipás, para velocidades mais elevadas; características estas aceitáveis em sistemas de geração de eletricidade, porém incompatibilizam seu uso em sistemas que requeiram altos momentos de força e ou carga variável.

²³ Responsável pela conexão entre as pás e o eixo.

Eixo Vertical

A principal vantagem das turbinas de eixo vertical é não necessitar de mecanismo de direcionamento, sendo bastante evidenciada nos aeromotores por simplificar bastante os mecanismos de transmissão de potência.

Como desvantagem, apresenta o fato de suas pás, devido ao movimento de rotação, terem constantemente alterados os ângulos de ataque²⁴ e de passo²⁵ em relação à direção dos ventos, gerando forças resultantes alternadas, o que além de limitar o seu rendimento, causa vibrações acentuadas em toda sua estrutura.

- Rotor Savonius - Apresenta sua curva de rendimento em relação a velocidade próxima a do rotor de múltipás de eixo horizontal, mas numa faixa mais estreita e de menor amplitude. Seu uso, como o daquele, é mais indicado para pequenos sistemas de bombeamento d'água, onde os custos finais devido à simplicidade do sistema de transmissão e construção do rotor compensam seu menor rendimento.
- Rotor Darrieus - Por ter curva de rendimento com característica próxima à dos rotores de três pás de eixo horizontal são utilizados para geração de eletricidade, porém é muito mais susceptível a danos provocados por ventos muito fortes. Desta forma, o Darrieus parece ficar em plena desvantagem em relação ao rotor de eixo horizontal, sendo seu uso pouco notado.

Para os aerogeradores de eixo horizontal pode-se encontrar duas opções de desenho, quanto à posição do rotor em relação à torre: o disco varrido pelas pás pode estar a jusante do vento (*downwind rotors*) ou a montante do vento (*upwind rotors*), como pode ser visto na Fig. 2.11.

²⁴ O ângulo de ataque é um ângulo aerodinâmico que pode ser definido como o ângulo formado pela corda da pá e a direção do seu movimento relativa ao vento aparente.

²⁵ O ângulo de passo é um ângulo mecânico, definido pelo o ângulo entre a linha de corda e o plano de rotação do sistema rotor.

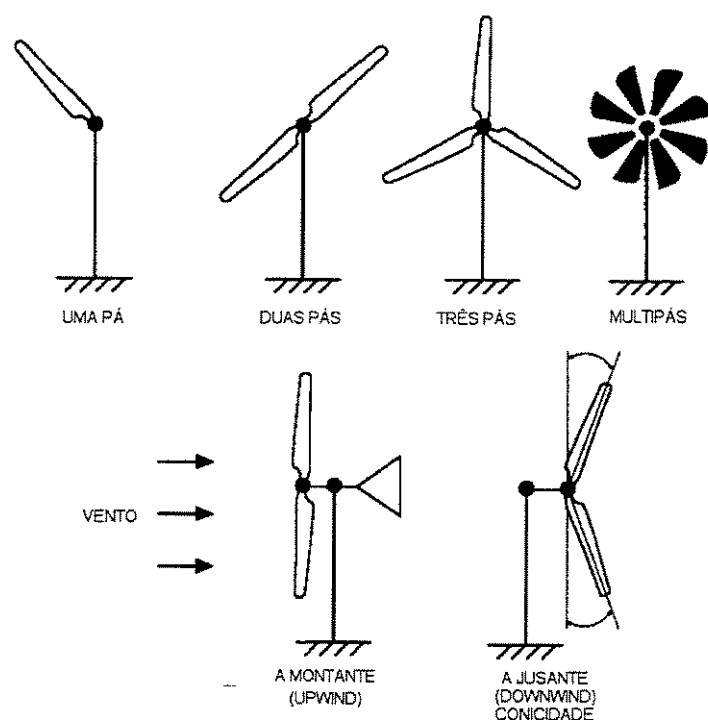


Figura 2.11 – Diferentes tipos de rotores

Fonte: Gipe (1995).

Uma razão para localizar o rotor a jusante do vento é que esse arranjo facilita a conicidade do rotor. O ângulo de conicidade é vantajoso por aliviar as tensões no cubo do rotor, equilibrando parcialmente os momentos devidos às forças centrífugas e ainda por orientar as pás. A desvantagem de localizar o rotor a jusante do vento é que as pás sofrem carregamento cíclico (causadores de fadiga) quando elas passam pela sombra aerodinâmica²⁶, apesar desse efeito poder ser minimizado afastando as pás da torre com ângulo de conicidade.

A localização do rotor a montante da torre reduz o efeito de interferência cíclica da torre (sombra) nas pás. Entretanto, o rotor deve ser sem articulações e posicionado bem adiante da torre, mesmo sob condições extremas de velocidade de vento.

²⁶ A cada passo da pá por trás da torre será produzida uma variação da corrente de ar que incide sobre o rotor, ocasionando esforços periódicos.

Não existe nenhuma evidência nítida quanto a qual localização do rotor - quer a montante, quer a jusante - seja a mais vantajosa, pelo menos no que concerne aos aspectos de custo total de máquinas eólicas.

É possível a utilização do número de pás que se deseje porém, para soluções economicamente viáveis, estuda-se um máximo de três pás para aerogeradores conectados à rede, sendo que comercialmente são fabricados equipamentos de duas ou três pás. Geralmente, o custo de aerogeradores de duas pás é menor e proporciona a mesma potência de saída. Já aerogeradores de três pás possuem um comportamento dinâmico mais suave (equilíbrio melhor das forças giroscópicas) e fornece oscilações menores de torque no eixo, o que simplifica a transmissão mecânica.

Se um rotor de duas pás é escolhido, é usual que o rotor seja articulado, permitindo uns poucos graus de movimento perpendicular ao eixo de rotação. Com um cubo articulado, cada pá, ao passar pelo topo do círculo de rotação - onde a velocidade do vento é maior devido ao gradiente vertical - move-se um pouco para trás; ao mesmo tempo a outra pá, no curso inferior do círculo de rotação - onde a velocidade do vento é menor - move-se para frente. Este movimento de articulação alivia significativamente as tensões no cubo do rotor, compensando custo extra da articulação do mesmo. Como o peso próprio das pás introduz cargas cíclicas na raiz (no plano de rotação), e também penaliza a estrutura da torre, as pás devem obedecer ao critério de peso mínimo, resistência à fadiga e rigidez estrutural.

Os diferentes tipos de materiais que compõem as pás são:

- Laminados de madeira/epoxi: Essa fibra natural, que também constitui um material composto, evoluiu ao longo dos anos para suportar cargas de fadiga induzidas pelo vento, que têm muito em comum com aquelas a que são submetidos os rotores de aerogeradores. São leves, têm ausência de problemas de corrosão e a facilidade de construção de formas complexas. Em contrapartida, têm alto custo de fabricação, poucas informações a respeito da manutenção de suas características a longo prazo, baixa rigidez e problemas com umidade (o que pode causar degradação das propriedades mecânicas e variações dimensionais, que enfraquecem a estrutura das pás e podem causar rompimentos na estrutura) e radiação ultravioleta.

- Alumínio: a maior parte dos aerogeradores do tipo Darrieus usam pás feitas de ligas de alumínio, extrudadas na forma de perfil aerodinâmico. Entretanto, tem-se dúvidas quanto à possibilidade de se atingir a vida útil de 20 anos ou mais.
- Fibra de vidro reforçada com epoxi: apresenta as mesmas vantagens das pás de madeira/epoxi e ainda tem uma tecnologia de construção bem desenvolvida e um bom conhecimento de seu comportamento a fadiga. Também tem alto custo de fabricação, baixa rigidez e problemas com umidade e radiação ultravioleta. É o material utilizado em quase todas as pás dos aerogeradores dos parques eólicos da Califórnia (EUA), e já foi utilizado em rotores de até 78m de diâmetro. As pás em materiais compostos possibilitam uma geometria aerodinâmica lisa, contínua e precisa. As fibras são colocadas estruturalmente nas principais direções de propagação das tensões quando em operação.
- Aço: O aço estrutural é disponível a custo relativamente baixo no mercado interno de alguns países e há bastante experiência na sua utilização em estruturas aeronáuticas de todos os tamanhos. No entanto, tem-se a necessidade de proteção contra a corrosão, para a qual existem diversas alternativas possíveis e a dificuldade de construção de formas complexa. As desvantagens do aço trazem consequências mais significativas nos aerogeradores de grande porte, já que as pás desse material tendem a ser pesadas, o que acarreta aumentos de peso e custo de toda a estrutura suporte (problemas predominantes de fadiga, nestas máquinas, são devido ao próprio peso das pás). Estes inconvenientes fazem com que este material seja cada vez menos utilizado.
- Fibra de carbono e/ou Kevlar: são materiais compostos mais avançados, que podem ser utilizados em áreas críticas (longarina da pá²⁷, por exemplo), para melhorar a rigidez da estrutura. Tem sido utilizados experimentalmente, mas tais materiais tem preços altos demais para serem utilizados nos aerogeradores economicamente mais competitivos.

²⁷ A longarina da pá refere-se ao membro mais forte da estrutura do rotor, disposta no sentido longitudinal.

2.4.3. Sistemas de orientação

Os aerogeradores de eixo horizontal necessitam de um sistema que oriente o rotor, ou seja, detecte a orientação do vento e situe o rotor na mesma direção. Este fato diminui consideravelmente as perdas de potência.

Estes aerogeradores estão sujeitos a grandes esforços durante as mudanças de velocidade e direção dos ventos. Ao sistema de orientação caberá posicionar o rotor, evitando alterações bruscas, quando ocorrerem mudanças na direção do vento. Existem vários sistemas de controle, escolhidos de acordo com a potência da instalação eólica.

Para máquinas de pequena e média potência (<50kW), o dispositivo mais adequado de orientação costuma ser uma cauda, geralmente de superfície plana, situada no extremo de um suporte unido ao aerogerador. Qualquer alteração na posição de equilíbrio gera uma força de empuxo que tende a posicionar o aerogerador novamente na posição original. É recomendável que a cauda seja instalada fora da zona de turbulências criada pelo rotor.

Nas máquinas maiores (diâmetros superiores a 20 metros) utiliza-se o efeito da conicidade: as pás se inclinam um pouco, de forma que sua rotação descreva um cone. Quando o rotor não está orientado corretamente, as pás que se encontram mais a favor do vento recebem um maior empuxo aerodinâmico que tende a variar a orientação do rotor até conseguir a posição de equilíbrio, onde todas as pás se encontram submetidas ao mesmo empuxo. Nestas máquinas é necessário, ainda, um segundo sistema de orientação para facilitar a manutenção da mesma, com a utilização de motores auxiliares que funcionam automaticamente através de servomecanismos (mede a direção do vento e a compara com a do rotor – orientação assistida) que são os responsáveis pelo posicionamento adequado do rotor através de uma engrenagem.

2.4.4. Sistemas de regulação

Têm por objetivo controlar a velocidade de rotação, evitando flutuações produzidas pelas velocidades dos ventos. Os sistemas mais simples (sistema de frenagem), utilizados apenas em máquinas de pequeno porte e, geralmente, em instalações em que são aceitas variações na potência de saída, operam apenas na etapa de potência, evitando rotações muito elevadas, provocadas por ventos fortes, que poderiam colocar em perigo a integridade da máquina.

A potência contida no vento é proporcional ao cubo da velocidade do vento, mas velocidades muito altas de vento ocorrem com uma frequência relativa muito pequena. Estes ventos pouco frequentes contribuem muito pouco para a energia gerada, e não seria economicamente conveniente projetar aerogeradores para operar eficientemente sob tais condições; os elevados carregamentos nas pás e as grandes potências de pico acrescentariam custos extras substanciais ao custo do aerogerador e dariam um incremento de energia gerada muito pequeno. Estes custos extras podem ser evitados se for limitada a potência do aerogerador para ventos fortes.

Os modernos aerogeradores usam dois princípios de controle aerodinâmico diferentes para limitar a extração de potência à potência nominal do gerador. O mais passivo é o chamado “controle estol” e o ativo, “controle de passo”, sendo que o conceito de controle através de estol domina (Dutra, 2001).

O controle estol é um sistema passivo que reage à velocidade do vento. As pás do rotor são fixas em seu ângulo de passo e não podem girar em torno de seu eixo longitudinal. O ângulo de passo é escolhido de forma que, para velocidades de vento superiores a velocidade nominal, o escoamento (Fig. 2.12) em torno do perfil da pá do rotor descola da superfície da pá (estol), reduzindo as forças de sustentação e aumentando as forças de arrasto, atuando contra um aumento da potência do rotor. Para evitar que o efeito estol ocorra em todas as posições radiais das pás ao mesmo tempo, o que reduziria significativamente a potência do rotor, as pás possuem uma pequena torção longitudinal que as levam a um suave desenvolvimento deste efeito.

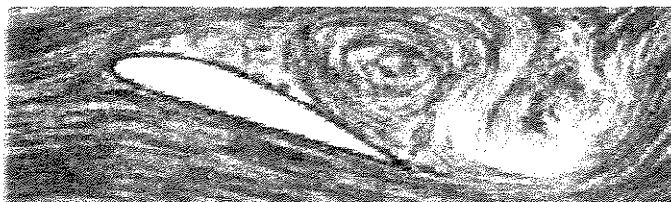


Figura 2.12 - Fluxo separado (estol) em volta do perfil

Fonte: Dutra (2001).

O controle de passo, por sua vez, é um sistema ativo que gira as pás do rotor em torno do seu eixo longitudinal, sempre que a potência nominal do gerador é ultrapassada, devido à um

aumento da velocidade do vento. Em outras palavras, as pás mudam o seu ângulo de passo para reduzir o ângulo de ataque. Esta redução do ângulo de ataque diminui as forças aerodinâmicas atuantes e, conseqüentemente, a extração de potência. Para todas as velocidades do vento superiores à velocidade nominal, o ângulo é escolhido de forma que a turbina produza apenas a potência nominal. Sob todas as condições de vento, o escoamento em torno dos perfis das pás do rotor é bastante aderente à superfície produzindo sustentação aerodinâmica e pequenas forças de arrasto (Fig. 2.13).



Figura 2.13 - Fluxo aderente ao perfil

Fonte: Dutra (2001)

2.4.5. Sistemas de transmissão

A energia mecânica obtida pelo rotor deve ser transmitida de alguma forma para poder ser aproveitada. A forma mais amplamente utilizada, e a de maior eficiência, é a transmissão por engrenagens, nas suas várias formas. Existem ainda outros sistemas de transmissão (óleo/hidráulico, hidráulico) mas são muito pouco utilizados e a multiplicação por correias ou correntes tem a possibilidade de baixos custos, porém são viáveis apenas para pequenas potências.

A frequência de rotores varia habitualmente na faixa de 15 a 220 rpm devido a restrições de velocidade na ponta da pá (tangenciais), que operam na ordem de 50 a 110 m/s, quase independentemente do tamanho do diâmetro. Como geradores trabalham, sobretudo os síncronos, em rotações mais altas (comum entre 1200 e 1800 rpm), torna-se necessária a instalação de sistemas de multiplicação entre o eixo do rotor e o eixo do gerador. Isto significa geralmente um multiplicador convencional, com dois ou três estágios de engrenagens, apesar de transmissões metálicas também terem sido experimentadas (Gipe, 1995).

Nos aerogeradores conectados às redes de distribuição elétrica, a rotação no gerador é de, tipicamente, 1500 rpm (para 50 Hz) e de 1800 rpm (para 60Hz). Para estas aplicações podem ser usados o gerador síncrono ou o assíncrono, no qual a rotação é então mantida dentro de uma certa porcentagem da rotação síncrona²⁸ (98 a 99,5 %). Devido a esta pequena (mas finita) margem de velocidades, é permitida alguma absorção de energia das flutuações rápidas de vento na forma de energia cinética do rotor pela sua inércia. Desta forma, as flutuações de cargas nas engrenagens da caixa de multiplicação são levemente suavizadas.

Para alguns rotores de pequeno diâmetro (< 2 metros), é possível a conexão direta pois, por exemplo, rotores de 1 m de diâmetro podem atingir rotações de até 2000 rpm. Também, para potências na ordem de poucos quilowatts, geradores especiais podem ser construídos, com baixa rotação, para conexão direta aos rotores. Para potências acima de 2 kW, e rotores com mais de 3 m de diâmetro, a regra geral é a utilização de alguma forma de multiplicador de velocidades entre o rotor e o gerador.

2.4.6. Sistemas de geração

O sistema de aproveitamento da energia, que gera uma turbina eólica, mais utilizado atualmente e que é o de maior interesse é a produção de energia elétrica, devido à facilidade de manipulação e transporte inerente a este tipo de energia, assim como a versatilidade de suas aplicações posteriores.

A transformação de energia mecânica de rotação em energia elétrica através de equipamentos de conversão eletromecânica é uma tecnologia amplamente dominada, com grupos geradores correntemente industrializados e comercialmente disponíveis. A problemática na integração destes grupos existentes a sistemas de conversão eólica envolve:

- variações na velocidade do vento (extensa faixa de rotações por minuto para a geração);
- variações do torque de entrada (posto que variações na velocidade do vento induzem variações de potência disponível no eixo conjunto gerador);
- exigência de frequência e tensão constantes na energia final produzida;

²⁸ Esta margem de velocidades é denominada escorregamento.

- facilidade de instalação, operação e manutenção dos sistemas em locais isolados e distantes (os equipamentos devem ter alta confiabilidade);
- baixos custos.

O sistema elétrico de um aerogerador está condicionado pelas características de operação do rotor (velocidade constante ou variável) e pelo aproveitamento da energia obtida (conexão direta à rede ou sistema de armazenamento). Os geradores que transformam a energia mecânica em elétrica podem ser dínamos ou alternadores. Estes últimos, por sua vez, podem ser de indução (assíncronos), de excitação (síncronos) ou ainda geradores de comutador de corrente alternada (muito pouco utilizados). Cada um destes sistemas de geração tem diferentes características, tanto nos requerimentos de entrada quanto nas particularidades da corrente de saída (WEG, 2001).

O tipo de gerador decididamente influencia o comportamento e a operação do aerogerador e suas interações com a rede. As tensões mecânicas e as flutuações rápidas de potência gerada diminuem quanto maior for a capacidade e a amplitude das variações de rotação permissíveis no gerador.

Quando a máquina fornece diretamente corrente contínua (dínamos), o faz através de um coletor que possui escovas que se desgastam com o uso, sendo necessária a manutenção periódica. Esta máquina é capaz de gerar eletricidade em baixas rotações e a energia elétrica produzida pode ser armazenada em sistemas de armazenamento (banco de baterias).

Quando a corrente gerada é alternada, temos um alternador que, para uma mesma potência, é mais barato que o dínamo e não utiliza escovas (menor manutenção). Por trabalhar com um elevado número de rotações, necessita de um multiplicador (seção 2.4.5), sendo seu rendimento superior ao dos dínamos.

Para aplicações isoladas, onde geralmente o objetivo é carregar baterias, é utilizado o gerador de corrente contínua. Neste, não há a necessidade de controle da velocidade do rotor e a tensão é independente da velocidade, uma vez que se exerce um controle sobre o campo; entretanto, geralmente são mais pesados, mais caros, a fabricação é principalmente para baixas potências, necessita de regulador de tensão acoplado ao campo e de manutenção periódica. Já

para os aerogeradores conectados à rede, as principais opções que existem são: geradores síncronos, geradores assíncronos (de indução) e geradores de comutador de corrente alternada.

Geradores Síncronos

Grande parte dos sistemas de conversão de energia eólica construídos até hoje, de média e grande escala de produção, usam geradores síncronos para a conversão eletromecânica. O estado de desenvolvimento tecnológico de tais equipamentos os recomenda fortemente. Como principais vantagens, pode-se citar que não há virtualmente limitação de potência para sua fabricação, podem ser ligados diretamente à rede elétrica²⁹, possuem alta eficiência ($\eta \approx 0,98$) e permitem melhor controle do fator de potência da carga. Sobre as desvantagens, necessitam de regulador de tensão acoplado ao campo e é necessário manter velocidade de rotação constante no sistema (se ligado à rede), posto que a constância de sua frequência depende intrinsecamente da constância da velocidade de rotação; caso contrário, poderá apresentar problemas de instabilidade. Desta forma, os sistemas de controle são mais caros, requerem flexibilidade na potência e ainda é necessário a utilização de um controle da velocidade do rotor para um bom sincronismo.

Geradores Assíncronos

Comparativamente com geradores síncronos, necessitam de maior torque de partida. Para o gerador de indução, variações limitadas de rotação são possíveis, dentro da margem de escorregamento do gerador. Isto permite maior elasticidade em rotação do que o gerador síncrono, o que reduz tensões mecânicas e flutuações elevadas de potência gerada quando da ocorrência de rajadas de vento de curta duração (permitindo alguma absorção da energia cinética pela inércia do rotor) e são eliminados os problemas de instabilidade em transientes. Além disso, geradores de indução são mais robustos, requerem mínima manutenção e têm uma longa vida em operação.

O gerador de indução também possibilita conexão direta à rede sem a necessidade de sincronização ou de regulação de tensão. Entretanto, alguns problemas podem ocorrer com a magnetização, a corrente de partida (perturbações na rede elétrica) e com o controle de potência

²⁹ Deseja-se deixar claro que para a conexão dos aerogeradores à rede elétrica deve-se observar as características da mesma (tensão e frequência).

reativa (utilização de capacitores para a correção do fator de potência), especialmente nas seções de alta impedância da rede elétrica onde tiver instalado. No caso dos parques eólicos da Califórnia, praticamente todos os aerogeradores em uso têm geradores de indução.

Geradores de Comutador de Corrente Alternada

São geradores adaptados especialmente para trabalharem em frequência variável. Sua concepção é similar às excitatrizes de grandes turbogeradores (1000 MW) do tipo conhecido sob o nome de *brushless excitation system*. Têm como principais vantagens que a frequência de saída é sempre igual à frequência de excitação (independe da velocidade de rotação do eixo do gerador), melhor controle do fator de potência da carga e podem ser usados eventualmente como gerador síncrono. Por outro lado, têm um custo da ordem de 20% acima de geradores de corrente contínua, exigem manutenção periódica (troca de escovas) e a limitação tecnológica de potência situa-se na faixa de 5 MW.

2.4.7. Acessórios

A tecnologia eletrônica moderna para grandes potências, tornou comerciais retificadores e inversores capazes de operar em potências comuns de sistemas de conversão. Geradores de corrente contínua, não considerados anteriormente em faixas superiores de potência devido ao alto custo dos inversores associados a este sistema para a geração de corrente alternada, começam a ser reconsiderados em média ou larga escala de produção pela facilidade de armazenamento elétrico em conjuntos de baterias e o desenvolvimento de inversores.

Armazenamento

Em muitos casos, a curva de demanda de energia elétrica não coincide com a disponibilidade de eletricidade gerada pelos sistemas eólicos isolados (seção 2.5.2) e faz-se necessário o armazenamento. Para tanto, as baterias são o meio mais utilizado. Porém, há a conversão de energia elétrica em energia química no interior da bateria, resultando em perdas para o sistema, diminuindo a eficiência do mesmo.

Controlador de carga

É utilizado em sistemas eólicos com o intuito de proteger o sistema de armazenamento, composto pelas baterias, de sobrecargas e descarga profunda, regulando a entrada de corrente proveniente do aerogerador para a bateria e a saída de corrente das baterias para a carga, evitando que a bateria se sobrecarregue ou que opere com tensões inferiores às de utilização normal. É também função do controlador de carga impedir que uma eventual corrente possa ser conduzida das baterias até aerogerador nos períodos em que a eletricidade não está sendo gerada.

Inversor.

Este é um dispositivo eletrônico responsável pela conversão da corrente contínua, fornecida pelo aerogerador, em alternada. Normalmente, trabalha com tensões contínuas de 12, 24, 48 ou 120V_{CC} na entrada e 120/127 ou 220 V_{CA} na saída em frequência de 50 ou 60 Hz. Alguns inversores apresentam, em sua tensão de saída, formas de onda praticamente senoidal enquanto que outros trabalham com onda retangular ou onda quadrada. A correta especificação do inversor depende das características da carga a ser acionada. Os inversores de onda quadrada são os que possuem o menor rendimento e grande distorção harmônica (da ordem de 40%); os inversores com saída senoidal modificada possuem distorção menor (da ordem de 20%) e eficiência maior (90%); já os inversores de saída senoidal são os que mais se aproximam da forma de onda fornecida pela concessionária de energia com eficiências superiores a 95% e distorção harmônica inferior a 5%. Obviamente os custos destes equipamentos variam diretamente com a qualidade dos mesmos.

Capítulo 3

A Energia Eólica e o Meio Ambiente

Com a preocupação em torno das questões ambientais, iniciadas com grande pressão devido aos acidentes nucleares nos reatores de Three Mile Island em 1979, nos Estados Unidos e, mais tarde, em 1986 na cidade de Chernobyl, na ex-União Soviética, a busca de novas soluções para o fornecimento de energia elétrica impulsionam a comunidade mundial a abrir um grande espaço para a penetração das energias renováveis, em especial a energia eólica.

Nos últimos anos, países como Alemanha, Dinamarca, Estados Unidos, entre outros, buscando atender uma melhor qualidade no suprimento energético, engajaram-se no desenvolvimento de tecnologia e expansão do parque industrial, dando incentivos e subsídios ao setor, estimulando o crescimento de mercado e o desenvolvimento tecnológico, alavancando recursos a ponto de fixar a energia eólica no mercado mundial com tecnologia, qualidade e confiabilidade, fazendo desta uma opção imprescindível para o fornecimento de energia limpa em grandes potências.

O aproveitamento dos ventos para geração de energia elétrica apresenta, como toda tecnologia energética, algumas características ambientais desfavoráveis como, por exemplo: impacto visual, ruído, interferência eletromagnética, danos à fauna. Porém, algumas destas características podem ser significativamente minimizadas e até mesmo eliminadas com planejamento adequado e inovações tecnológicas.

A energia eólica por sua vez, não utiliza a água como elemento motriz, nem como fluido refrigerante e não produz resíduo radioativo ou gasoso. Pode-se ainda utilizar a área do parque eólico como pastagens e outras atividades agrícolas.

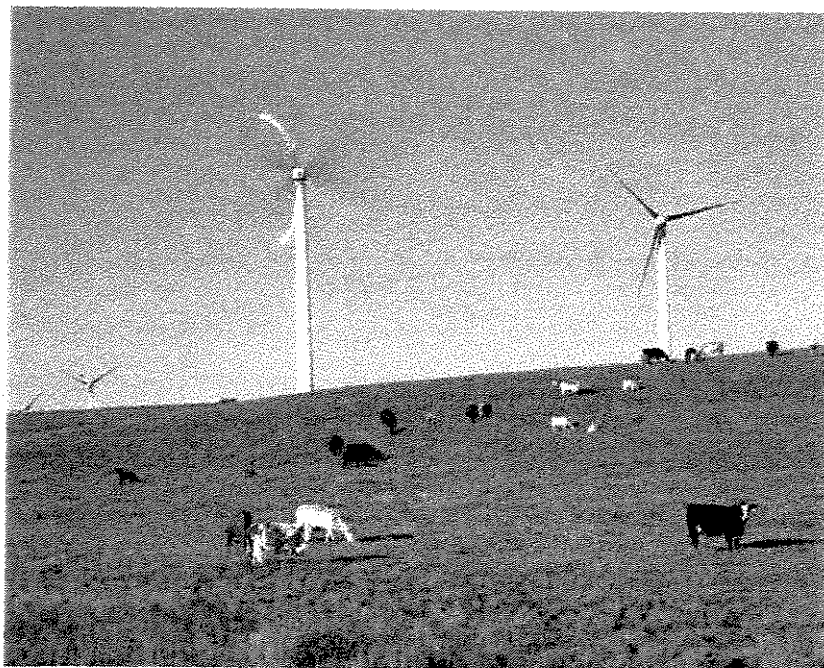


Figura 3.1 – Prática de atividades agropecuárias em parques eólicos

Fonte: NREL (2001).

O Relatório *Wind Force 10*, publicado em outubro de 1999, em um esforço conjunto do *Greenpeace International*, *Forum for Energy and Development* e pela *European Wind Energy Agency*, mostra que é possível complementar 10% da geração de energia elétrica mundial utilizando energia eólica, tornando a energia eólica uma fonte energética atraente para as próximas décadas, preocupando-se com as questões ambientais (Greenpeace *et al*, 1999).

3.1 Benefícios ambientais

O mais importante benefício ao meio ambiente da geração eólica é a não-emissão de dióxido de carbono na atmosfera. O dióxido de carbono é o gás com maior responsabilidade pelo agravamento do efeito estufa levando a mudança climática global a consequências desastrosas. A moderna tecnologia eólica apresenta um balanço energético extremamente favorável e as

emissões de CO₂ relacionadas com a fabricação, instalação e serviços durante todo ciclo de vida do aerogerador são “recuperados” depois dos três a seis meses de fabricação.

Além do mencionado anteriormente, estes fatores também impulsionam a energia eólica:

- Reduz a dependência de combustíveis fósseis, sendo o vento um recurso abundante e renovável.
- As centrais eólicas ocupam um pequeno espaço físico e permitem a continuidade de atividades entre os aerogeradores (pastagens e agricultura).
- Melhora a economia local e oferta de empregos. Estudos realizados na Escócia calculam ser entre 500 a 1500 empregos associados a cada 0,3 a 1 GW de potência instalada.
- A emissão de poluentes é mínima, não contribuindo para a mudança climática global, chuva ácida, etc.
- É uma indústria em grande ascensão e com bom potencial no Brasil (principalmente em algumas regiões do litoral nordestino).
- Contribui para a diversidade de suprimento de energia e pode ser conectada à rede.
- A tecnologia está completamente dominada e ainda em grande desenvolvimento, com redução constante de custos de construção e geração.

3.1.1 Emissão de gases

O mais importante benefício que a energia eólica oferece ao meio ambiente está no fato de que ela não emite poluentes ou CO₂ durante sua operação. Dessa forma, pode-se fazer um comparativo entre cada unidade (kWh) de energia elétrica gerada por turbinas eólicas e a mesma energia que seria gerada por uma planta convencional de geração de energia elétrica. Ao fazer essa análise chega-se à conclusão de que a energia eólica apresenta grandes vantagens na redução de emissão de gases de efeito estufa e na redução da concentração de CO₂ durante a sua operação³⁰. Com o avanço de programas de eficiência energética, com o propósito de tornar mais eficiente o parque gerador de energia, as emissões de CO₂ e de gases de efeito estufa têm-se

³⁰ A redução na emissão de gases de efeito estufa seria contabilizado na substituição das fontes fósseis convencionais de geração de eletricidade por fazendas eólicas.

reduzido ao longo dos anos, mas permanecem, ainda, em uma faixa muito alta (Jacobson *et al*, 2001).

Preocupações com o crescimento da concentração de CO₂ e de gases de efeito estufa na atmosfera têm mobilizado vários países na busca de soluções efetivas para a redução das emissões nos próximos anos. A preocupação com o resultado futuro das emissões de gases de efeito estufa por parte de vários países do mundo têm criado um ambiente muito favorável ao uso da energia eólica como uma fonte renovável de energia. Uma turbina de 600kW, por exemplo, instalada em uma região favorável poderá, dependendo do regime de vento e do fator de capacidade, evitar a emissão de 20.000 a 36.000 toneladas de CO₂, equivalentes à geração convencional, durante seus 20 anos de vida útil estimado (EWEA, 2000d).

Os benefícios a serem obtidos na redução da emissão do dióxido de carbono no *mix* energético do país dependem de qual tipo de geração a energia eólica estará substituindo. Estudos realizados em 1993, pelo World Energy Council, mostrados na Tab. 3.1, comparam as emissões de diferentes tecnologias de geração de energia elétrica.

Supondo-se que o carvão e o gás natural ainda contarão com a maior participação na produção de eletricidade nos próximos 20 anos – com a contínua tendência do uso do gás em substituição ao carvão – é razoável considerar como um valor médio de 600 ton./GWh a redução das emissões de dióxido de carbono pelo uso da geração eólica.

Das quatro tecnologias listadas a seguir na Tab. 3.1, que apresentam emissões de CO₂ abaixo do nível da energia eólica, somente as grandes hidrelétricas são competitivas comercialmente na atualidade. Entretanto, a utilização de grandes hidrelétricas tem sido discutida em países como o Canadá e o Brasil (que apresentam grandes plantas hidrelétricas instaladas cada vez mais longe dos centros consumidores) onde o apodrecimento da vegetação submersa nos grandes reservatórios produz uma quantidade substancial de gases de efeito estufa. Um dos principais gases proveniente da decomposição da vegetação submersa é o metano, cinquenta vezes mais potente que o CO₂. Os projetos de grandes hidrelétricas estão sendo gradativamente abandonados devido à redução dos potenciais (locais onde poderiam ser implementados novos sistemas), aos impactos ambientais na vida animal, causados pelas mudanças de habitat e nos protestos de opinião pública.

Tabela 3.1 – Emissões de CO₂ de diferentes tecnologias de geração de eletricidade.

Tecnologias	Emissões de CO ₂ nos estágios de produção de energia (ton./GWh)			
	Extração	Construção	Operação	Total
Planta convencional de queima de carvão	1	1	962	964
Planta de queima de óleo combustível	-	-	726	726
Planta de queima de gás	-	-	484	484
Energia térmica dos oceanos	ND	4	300	304
Plantas geotérmicas	<1	1	56	57
Pequenas hidrelétricas	ND	10	ND	10
Reatores nucleares	2	1	5	8
Energia eólica	ND	7	ND	7
Solar fotovoltaico	ND	5	ND	5
Grandes hidrelétricas	ND	4	ND	4
Solar térmico	ND	3	ND	3
Lenha (Extração programável)	-1.509	3	1.346	-160

ND: Não disponível

Fonte: World Energy Council (1993).

3.2 Problemas para o meio ambiente

3.2.1 Impacto sobre a fauna

A maior preocupação relativa à fauna é com os pássaros, os quais podem vir a colidir com estruturas (torres de alta tensão, mastros, janelas de edifícios) e com as turbinas eólicas, devido à dificuldade de visualização. Outros motivos, como o tráfego de veículos em auto-estradas e a caça, também são responsáveis pela morte dos pássaros. Porém o comportamento dos pássaros e as taxas de mortalidade tendem a ser específicos para cada espécie e também para cada lugar. Estimativas de mortes de pássaros nos Países Baixos (Fig. 3.2), causadas por várias ações diretas e indiretas do homem, mostram que o tráfego de veículos apresenta uma taxa que, em

comparação às estimativas de mortes por parque eólico de 1 GW, é cem vezes maior (Bourillon, 1999).

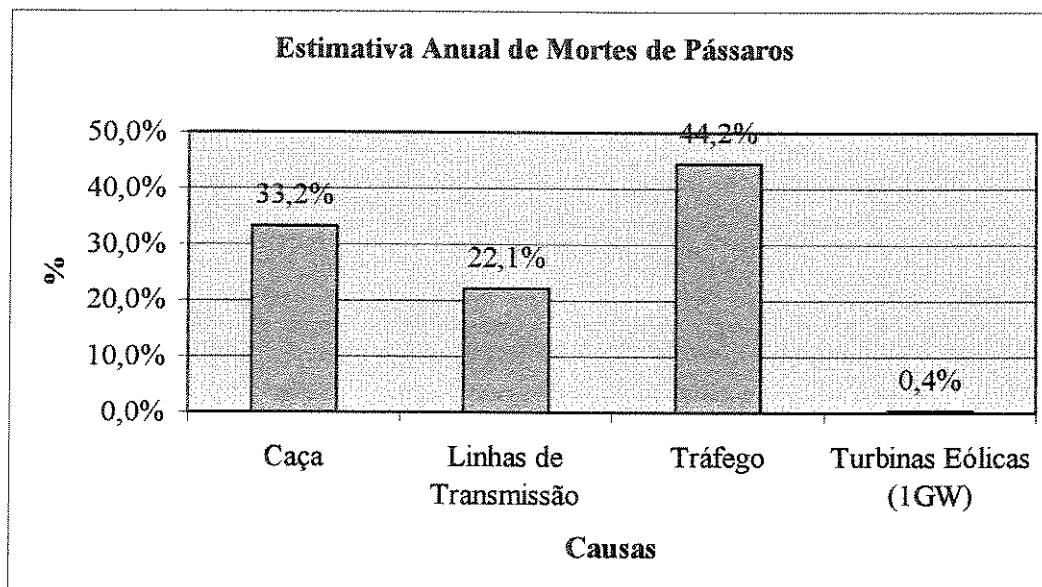


Figura 3.2 - Estimativa de mortes anuais de pássaros nos Países Baixos

Fonte: Bourillon (1999).

Na Alemanha foi contabilizado um total de 32 pássaros mortos por turbinas eólicas entre os anos de 1989 e 1990, em todos os parques eólicos do país. Em comparação a esse número, também foram computados os pássaros vitimados pelo impacto em torres de antenas. Encontrou-se, para o ano de 1989, um total de 287 pássaros mortos na Alemanha devido a este fator (DEWI, 1996).

O pior caso de colisão de pássaros em turbinas eólicas aconteceu nas proximidades de Tarifa, na Espanha. No final de 1993, 269 turbinas eólicas foram instaladas de um total projetado de 2.000 turbinas. Localizado nas principais rotas de migração de pássaros da Europa Ocidental, o local onde se instalaram as turbinas é um “grande mal entendido” segundo o diretor da Agência Espanhola de Energia Renovável –IDAE, que fez uma das mais extraordinárias admissões de culpa:

“O que me ocorreu sobre o fato é que foi um inoportuno lapso de memória. Ninguém pensou nas migrações dos pássaros”.

Muitos pássaros de inúmeras espécies ameaçadas de extinção morreram em colisões com as turbinas (World Energy Council, 1993).

Fora das rotas de migração, os pássaros são raramente incomodados pelas turbinas eólicas. Estudos com radares em Tjaereborg, região oeste da Dinamarca, mostram que no local onde foi instalada uma turbina eólica de 2 MW, com 60 m de diâmetro, os pássaros tendem a mudar sua rota de vôo entre 100 a 200 m, passando por cima ou ao redor da turbina, em distâncias seguras. Esse comportamento tem sido observado tanto durante a noite quanto durante o dia. Na Dinamarca é comum um grande número de ninhos de falcões nas torres das turbinas eólicas (Elliot, 2000).

3.2.2 Ruídos

O impacto ambiental do ruído gerado pelo sistema eólico ao girar suas pás foi um dos mais importantes temas de discussão e bloqueio da disseminação da energia eólica durante a década de oitenta e início da década de noventa. O desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, juntamente com as novas exigências de um mercado crescente e promissor, promoveram um avanço significativo na diminuição dos níveis de ruído produzido pelas turbinas eólicas. Este problema está relacionado com fatores como a aleatoriedade do seu funcionamento³¹ e a variação da frequência do ruído uma vez que este se ajusta diretamente com a velocidade de vento incidente.

O ruído proveniente das turbinas eólicas tem duas origens: mecânica e aerodinâmica. O ruído mecânico tem sua principal origem da caixa de engrenagens, que multiplica a rotação das pás para o gerador. O conjunto de engrenagens funciona na faixa de 1.000 a 1.500 rpm, onde a vibração do mesmo é transmitida para as paredes da nacele, onde é fixada. A transmissão de ruído mecânico também pode ser ocasionada pela própria torre, através dos contatos desta com a nacele. Com o avanço dos estudos a respeito do ruído mecânico gerado pelas turbinas eólicas, é possível a construção das mesmas com níveis de ruído bem menores, melhorando a tecnologia.

³¹ Mesmo em locais onde o período de medição dos ventos represente uma série histórica de vários anos, a previsão de ventos é um fator dependente de várias condições climáticas globais, tornando seu comportamento aleatório ao longo do dia. As medições e séries históricas representam um importantíssimo fator de viabilidade técnica e econômica. No caso em que é citada a aleatoriedade do seu funcionamento, deseja-se deixar claro que a aleatoriedade está na velocidade instantânea que pode mudar a qualquer momento seja para o aumento ou a redução da velocidade.

Uma outra tecnologia utilizada em turbinas eólicas está no uso de um gerador elétrico multipolo conectado diretamente ao eixo das pás. Esse sistema de geração dispensa o sistema de engrenagens para multiplicação de velocidade, pois o gerador funciona mesmo em baixas rotações. Sem a principal fonte de ruído presente nos sistemas convencionais, as turbinas que empregam o sistema multipolo de geração de energia elétrica são significativamente mais silenciosas.

O ruído aerodinâmico é um fator influenciado diretamente pela velocidade do vento incidente sobre a turbina eólica. Ainda existem vários aspectos a serem pesquisados e testados tanto nas formas das pás quanto na própria torre para a sua redução. Pesquisas em novos modelos de pás, procurando um máximo aproveitamento aerodinâmico com redução de ruído, são realizadas, muitas vezes, de modo semi-empírico, proporcionando o surgimento de diversos modelos e novas concepções em formatos aerodinâmicos das pás.

A Fig. 3.3 mostra o resultado de um estudo do Instituto Alemão de Energia Eólica (*Deutsches Windenergie-Institut – DEWI*) sobre o nível de ruído de diversas turbinas eólicas disponíveis no mercado, no ano de 1995. Como pode ser observado, as turbinas eólicas até então disponíveis apresentavam um nível de ruído entre 90 e 100 dB, ou seja, essas turbinas, na sua maioria, eram muito barulhentas³². As leis referentes ao nível de ruído na Alemanha recomendam um afastamento de 200m de distância do mais próximo morador para níveis de ruído em 45 dB (DEWI, 1996). As relações entre distâncias e os níveis de ruído variam para vários tipos de construção ao longo do dia e também da noite. Essas distâncias estipuladas por lei na Alemanha restringiram a implantação de parques eólicos próximos aos grandes centros urbanos.

Muito esforço foi feito desde 1995 no desenvolvimento de uma geração de turbinas eólicas agora disponíveis no mercado. O desenvolvimento de tecnologias, ao longo dos últimos dez anos, na aerodinâmica das pás e nas partes mecânicas críticas, principalmente a caixa de engrenagem, tornou possível uma significativa redução dos níveis de ruído nas turbinas modernas.

³² Nível de ruído na faixa entre 90 e 100 dB pode ser comparado com o ruído gerado pelo tráfego de automotores em horário de pico ou até mesmo em máquinas pneumáticas em uso na construção civil.

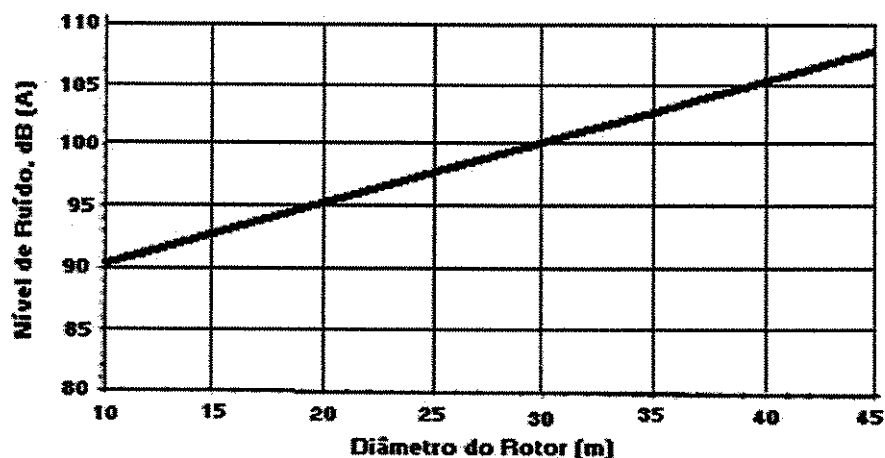


Figura 3.3 - Nível de ruído para diversas turbinas eólicas disponíveis em 1995.

Fonte: DEWI (1996)

3.2.3 Interferência Eletromagnética

Estudos realizados pela EWEA têm mostrado que o projeto cuidadoso de uma fazenda eólica evita qualquer distúrbio em sistemas de telecomunicações (ondas de rádio e microondas são utilizadas para uma grande variedade de propósitos de comunicação). Isto, contudo, não é suficiente para uma correta determinação das questões envolvidas uma vez que qualquer grande estrutura em movimento pode produzir interferência eletromagnética (IEM). Turbinas eólicas podem causar IEM por reflexão de sinais das pás de modo que um receptor próximo recebe um sinal direto e um refletido. A interferência ocorre porque o sinal refletido é atrasado devido à diferença entre o comprimento das ondas alterado por causa do movimento das pás. A IEM é a maior em materiais metálicos, que são refletores e mínimos para pás de madeira, que absorvem. A fibra de vidro reforçada com epoxi, que é utilizada na maioria das pás modernas, é parcialmente transparente às ondas eletromagnéticas e, portanto diminui o efeito da IEM (McGowan *et al*, 2000).

Os sinais de comunicação civis e militares podem ser afetados por IEM, incluindo transmissões de TV e rádio, comunicações de rádio microondas e celular, comunicação naval e sistemas de controle de tráfego aéreo. Os projetistas de turbinas eólicas consultam as autoridades civis e militares para determinar as interferências e problemas que afetem os links microondas e

sistemas de comunicação aérea devem ser evitados. A interferência em um pequeno número de receptores de televisão doméstica é um problema ocasional que normalmente é sanado com uma gama de medidas sem alto custo, como a utilização de uma série de retransmissores e/ou receptores. Turbinas eólicas e sistemas de telecomunicações coexistem em muitos locais da Europa.

3.2.4 Uso da terra

Geralmente 99% da área em que uma fazenda eólica típica está construída fica fisicamente disponível para uso como antes. As fundações das turbinas, embora com aproximadamente 10 m de diâmetro, estão normalmente enterradas, permitindo qualquer atividade agrícola existente ser mantida até próxima à base de torre (Fig. 3.4). Não há evidências de que fazendas eólicas interfiram em grande extensão em terras cultiváveis ou agropecuárias (EWEA, 2000e)



Figura 3.4 – Prática de atividades agrícolas em parques eólicos

Fonte: NREL (2001).

A energia dos ventos é, além disso, uma fonte de energia primária difusa relativa³³, mas qualquer comparação válida com outros meios de geração em uso de terra deve considerar o ciclo

³³ Entende-se por energia difusa relativa a que se encontra espalhada e que é intermitente.

de combustível total em cada caso. Na comparação com outras tecnologias, a energia eólica requer um espaço menor para produzir a mesma quantidade de eletricidade (Tab. 3.2).

Tabela 3.2 – Uso da terra para diferentes tecnologias de geração de eletricidade

Tecnologias	Terra requerida em 30 anos (m²/GWh)
Geotérmica	404
Eólica	800 - 1335
Solar Fotovoltaica	3237
Solar Termal	3561
Carvão	3642

Fonte: EWEA (2000c).

Uma proporção grande de área de terra utilizada para a geração com queima de carvão é contabilizada principalmente pela mineração e atividades de transporte, localizadas longe das usinas elétricas.

Os 4.300 aerogeradores instalados na Dinamarca pelo fim de 1997 produzem a mesma quantidade de eletricidade do total consumido em 1952. Acima de 7% do consumo nacional de eletricidade na Dinamarca é agora abastecida por energia eólica e o país está caminhando para atingir a meta de 10% no ano 2005. Esta meta poderia ser atingida com a instalação de 1000 turbinas do atual estado da arte, devido às melhorias tecnológicas e aumento da capacidade dos aerogeradores. A área de terra requerida seria aproximadamente 100 km², onde apenas 1% seria utilizado para fundações das turbinas (EWEA, 2000b).

3.2.5 Impacto visual

As fazendas eólicas devem ser instaladas em áreas livres (sem obstáculos naturais) para que sejam comercialmente viáveis, sendo, desta forma, visíveis. A reação provocada por um parque eólico é altamente subjetiva. Muitas pessoas olham a turbina eólica como um símbolo de energia limpa sempre bem-vindo, outras reagem negativamente à nova paisagem.

Os efeitos do impacto visual têm sido minimizados, principalmente, com a conscientização da população local sobre a geração eólica. Através de audiências públicas e seminários, passa-se a conhecer melhor toda a tecnologia e, uma vez conhecendo-se os efeitos positivos da energia eólica, os índices de aceitação melhoram consideravelmente.

Um caso especial sobre impacto visual causado pelas turbinas eólicas foi estudado na Fazenda Eólica de Cemmaes, no Reino Unido. Essa fazenda foi uma das primeiras a ser construída no Reino Unido e é composta por 24 turbinas eólicas com uma capacidade total instalada de 7,2 MW. Foram feitas duas pesquisas nos anos de 1992 e 1994 onde, além dos impactos visuais, foram abordados impactos de ruído, econômicos, sociais, entre outros. A pesquisa foi feita com os moradores mais próximos à fazenda eólica num total de 134 pessoas. Na primeira etapa da pesquisa, apenas 4% dos pesquisados estavam preocupados com o impacto visual da fazenda eólica antes dela ser construída, mas diziam terem tido uma “agradável surpresa” após a construção. Na segunda fase da pesquisa, 6% manifestaram-se espontaneamente sobre o novo visual com as turbinas. Ao serem questionados sobre detalhes de aspectos visuais da fazenda eólica, 54% dos entrevistados responderam positivamente em relação às turbinas eólicas. Metade das respostas mostraram fortes convicções quanto ao aspecto positivo da nova paisagem enquanto que a outra metade foi positiva com algumas reservas. Segundo a pesquisa, 27% mostraram-se indiferentes ao observarem a fazenda eólica e 12% responderam negativamente ao questionário. Um dado interessante é que 62% dos que responderam ao questionário tiveram grande interesse em descrever as turbinas (Esslemont *et al*, 1996).

Um estudo conduzido pela AKF (1996), na Dinamarca, estimou os custos de som e impacto visual de turbinas eólicas - menos que US\$ 0,0012 por kWh de eletricidade produzido. O estudo foi primeiramente baseado em entrevistas com 342 pessoas que moravam próximas às turbinas eólicas e foram questionados quanto desejariam pagar para que as turbinas fossem removidas. Para checar os resultados das entrevistas, os preços de 74 casas situadas próximas às turbinas foram comparadas com similares situadas em qualquer outra parte. Compreendendo os benefícios ambientais de energia eólica, a reação pública para uma fazenda eólica tende a melhorar. A indústria tem dedicado esforço considerável para integração cuidadosa de novos projetos dentro da paisagem.

Capítulo 4

Fundamentos Teóricos da Energia Eólica

A avaliação da eficiência energética e da produção de eletricidade a partir de energia eólica não são simples de serem estimadas, pois dependem da medição exata da velocidade do vento e das características geográficas do local onde será instalado o aerogerador.

A eficiência global do sistema eólico relaciona a potência disponível do vento com a potência final que é entregue pelo sistema. Os rotores eólicos ao extraírem a energia do vento reduzem a sua velocidade; ou seja, a velocidade do vento frontal ao rotor (velocidade não perturbada) é maior do que a velocidade do vento atrás do rotor (na esteira do rotor). Uma redução muito grande da velocidade do vento faz com que o ar circule em volta do rotor, ao invés de passar através dele (Johansson *et al.*, 1993).

A condição de máxima extração de energia se verifica para uma velocidade na esteira do rotor igual a $1/3$ da velocidade não perturbada (Nfaoui, 1998). Em condições ideais, o valor máximo da energia captada por um rotor eólico é limitado pela eficiência de Betz, dada pelo fator $16/27$ ou 0,593. Em outras palavras, 59,3% da energia contida no fluxo de ar pode ser teoricamente extraída por uma turbina eólica. Na prática, entretanto, o rendimento aerodinâmico das pás reduz ainda mais este valor. Para um sistema eólico, existem ainda outras perdas, relacionadas com cada componente (rotor, transmissão, caixa multiplicadora e gerador). Além disso, o fato do rotor eólico funcionar em uma faixa limitada de velocidade de vento também irá contribuir para reduzir a energia por ele captada.

Analisar o potencial de energia eólica requer avaliação estatística das características do vento e mais particularmente da média de velocidade do vento e sua distribuição ao longo dos anos. Poje *et al.* (1998) afirmam que, em geral, o período de tempo de obtenção de dados a ser considerado para a avaliação do regime de ventos de um local é de 10 anos, para uma completa análise do real potencial de geração de eletricidade.

Para tanto, é necessária a utilização de funções matemáticas que ajustam precisamente as curvas de duração e frequência de ventos. Estas funções auxiliam ainda na determinação da eletricidade produzida ao longo de um período por um aerogerador, cujas especificações devem ser compatíveis com as características climáticas do local da instalação (Johnson, 1985).

Sobre estas funções, grande atenção é dada à função Weibull, que é um caso especial da distribuição gama generalizada (Lysen, 1983). É uma ferramenta para estimar a velocidade a diferentes alturas acima do solo bem como avaliar a eletricidade gerada, sendo que a distribuição probabilística do regime dos ventos é usualmente caracterizada por esta função.

O presente capítulo tem por objetivo descrever os fundamentos teóricos que governam a energia eólica, apresentando as equações e a eficiência dos sistemas eólicos, com destaque para a eficiência de Betz. A seguir, apresentam-se os fatores que influenciam diretamente o desempenho dos aerogeradores e os métodos estatísticos de caracterização dos regime dos ventos, ferramenta importante na avaliação destes sistemas.

4.1. Fundamentos Teóricos

4.1.1. A Energia contida nos ventos

A energia eólica provém da radiação solar uma vez que os ventos são gerados pelo aquecimento não uniforme da superfície terrestre. Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes a potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo (CRESESB, 1996).

Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais destacam-se a rugosidade do solo, os obstáculos e o relevo.

Os ventos (massas de ar em movimento) possuem energia cinética, que pode ser aproveitada com o uso de aerogeradores, os quais têm a capacidade de converter esta energia cinética contida nos ventos em energia elétrica.

Dessa forma, a energia cinética, E_c , contida em uma amostra de volume de ar, $A \times \delta x$, com a densidade do ar, ρ , movendo-se com uma velocidade, v , onde A é a unidade de área perpendicular à direção dos ventos e δx é paralelo à direção dos ventos, é dada por:

$$E_c = \frac{M v^2}{2} = \frac{\rho A (\delta x) v^2}{2} \quad (4.1)$$

O fluxo de energia, ou a densidade de energia dos ventos, é dado pela derivada da energia cinética por unidade de área, em relação ao tempo:

$$P = \frac{dE_c}{dt} \times \frac{1}{A} = \frac{\rho}{2} \left(\frac{\delta x}{\delta t} \right) v^2 = \frac{\rho v^3}{2} \quad (4.2)$$

Sendo determinada a energia contida nos ventos:

$$E = P.h = \frac{\rho v^3}{2} \cdot h \quad (4.3)$$

onde h representa o tempo, em horas.

A densidade do ar pode ser calculada aproximadamente pela temperatura, T , e a pressão, P , do local onde o aerogerador está posicionado por:

$$\rho = \frac{P}{R T} \quad (4.4)$$

onde R é a constante dos gases.

Esta correção pode ser substancial para o verão ou em grandes altitudes, onde os valores de pressão e temperatura diferem das condições normais de temperatura e pressão (CNTP). Como exemplo, para um aerogerador localizado a 2.000 metros, a densidade de energia do vento é 21% menor do que a encontrada ao nível do mar devido à altitude. Para uma temperatura de 30°C, existe um decréscimo de 5% (Johansson *et al.*, 1993).

4.1.2. Eficiência de Betz

A primeira teoria de quantidade de movimento foi estabelecida por W. Rankine e W. Froude, que a definiram para um elemento qualquer que fosse capaz de fornecer energia a um fluido. Nas pesquisas, as aplicações foram voltadas para as hélices de barco. Porém, a primeira teoria de quantidade de movimento que tratava de elementos (no caso, pás) que fossem capazes de extrair energia dos fluidos (ar) foi desenvolvida por Albert Betz, em 1920.

Betz se baseou na teoria de Rankine/Froude, sendo que esta continha algumas hipóteses que simplificaram em muito os cálculos realizados por Betz:

- Não importa a velocidade de rotação
- O ar é um fluido ideal sem viscosidade em todo espaço, salvo nas proximidades do plano do rotor
- O movimento do fluido independe do tempo sendo que todas as variáveis dependem apenas do ponto no espaço onde se efetua o cálculo
- Considera-se o ar incompressível e a densidade é constante em todo espaço
- O número de pás do rotor não influencia já que é considerado como um disco poroso que deixa o fluido passar (atravessar)
- Não é permitido cálculos locais em zonas determinadas do rotor
- Não se consideram efeitos como rajadas de vento, variações da velocidade do ar com o tempo, variações da velocidade de giro do motor, etc.

Pode-se imaginar que a máxima energia retirada dos ventos por uma turbina eólica é a energia cinética dos ventos que atravessam um círculo formado pela área das pás. Porém, o vento ainda possui velocidade (energia cinética) na esteira do rotor e, desta forma, nem toda energia é retirada dos ventos.

Em um modelo ideal, considera-se um cilindro de ar de área A , com um vento de velocidade v_1 entrando neste cilindro, passando pela área com velocidade \bar{v} e saindo com velocidade v_2 . Para este modelo, Betz desenvolveu a sua teoria (descrita a seguir), encontrando o máximo valor de energia que pode ser retirado dos ventos, mostrando ser este 16/27 da energia cinética de entrada.

A massa de fluxo de ar de densidade ρ através da área do rotor é determinada por:

$$\dot{M} = \rho A \bar{v} \quad (4.5)$$

Pela conservação do momento, a força que age na área do rotor é:

$$F = \dot{M}(v_1 - v_2) \quad (4.6)$$

Da conservação da energia, a potência despendida quando o vento passa pelas pás é:

$$P = \frac{\dot{M}}{2}(v_1^2 - v_2^2) = F \bar{v} = \dot{M} \bar{v}(v_1 - v_2) = \rho A \bar{v}^2 (v_1 - v_2) \quad (4.7)$$

Tomando-se:

$$\bar{v} = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (4.8)$$

e derivando a Eq. 4.8 em relação a v_2 , tem-se:

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial v_2} = \frac{1}{2} \quad (4.9)$$

Do último membro da Eq. 4.7, mantendo-se a velocidade de entrada v_1 constante, pode-se encontrar a velocidade v_2 onde a potência é máxima:

$$\frac{\partial P}{\partial v_2} = 0 = \rho A [\bar{v}(v_1 - v_2) - \bar{v}^2] \quad (4.10)$$

$$v_1 - v_2 - \bar{v} = \frac{v_1}{2} - \frac{3v_2}{2} = 0 \quad (4.11)$$

$$v_2 = \frac{v_1}{3} \quad (4.12)$$

$$\bar{v} = \frac{2v_1}{3} \quad (4.13)$$

Então, a máxima potência é:

$$P = \rho A \bar{v}^2 (v_1 - v_2) = 2 \left(\frac{2}{3} \right)^3 \frac{\rho A v_1^3}{2} \quad (4.14)$$

$$P = \frac{16}{27} \frac{\rho A v_1^3}{2}$$

Sendo assim, Albert Betz determinou que a eficiência aerodinâmica do rotor estava limitada a 16/27, ou 59,3% da energia presente nos ventos. Em alguns casos são encontrados valores próximos a 35% (Dutra, 2001).

4.1.3. Eficiência dos sistemas eólicos

O rotor³⁴, responsável por transformar a energia cinética presente nos ventos em energia mecânica, é o primeiro estágio de conversão da energia do vento em eletricidade sendo que os outros dois são a transmissão, que adequa as velocidades de rotação e o próprio gerador, responsável por converter a energia mecânica em energia elétrica.

Em média, a eficiência de conversão dos modernos aerogeradores está dividida da seguinte forma:

³⁴ Para os diferentes tipos de rotores, ver seção 2.4.2.

Tabela 4.1 – Valores médios da eficiência de conversão nos estágios do aerogerador

Estágios de conversão	Eficiência
Rotor	40 %
Transmissão	95 %
Gerador	95 %
Rajadas de vento ³⁵ e orientação da turbina ³⁶	95 %
Média geral	35 %

Fonte: Gipe (1995)

Atualmente, o padrão de rotores utilizados nos aerogeradores modernos são de três ou duas pás. Isto se deve ao fato da grande relação de potência extraída por área de varredura do rotor, muito superior ao rotor multipás, para velocidades mais elevadas; características estas aceitáveis em sistemas de geração de eletricidade, porém incompatibilizam seu uso em sistemas que requeiram altos momentos de força e/ou carga variável.

Rotores modernos, com mais de três pás, são apenas usados quando se necessita de um grande torque de partida, o que é basicamente o caso de bombeamento mecânico de água. Aerodinamicamente, no entanto, grande número de pás e alto torque de partida implicam em menor eficiência.

O rotor deve ser fabricado com grande esbeltez, precisão nos perfis aerodinâmicos e bom acabamento superficial, requisitos para maximizar a eficiência aerodinâmica. Esta depende das seguintes características geométricas das pás:

- Tamanho (comprimento): está determinado em função da potência desejada e fixado também pela frequência de rotação máxima, a qual a hélice não deve ultrapassar evitando, desta forma, tensões nas pás devido à força centrípeta. É importante estudar a vibração e a fadiga das pás, principalmente nas maiores.

³⁵ As rajadas de vento aqui consideradas são referentes a velocidades de vento superiores à de projeto do aerogerador, quando sua potência é reduzida (seção 2.4.4).

³⁶ Eficiência relativa ao posicionamento da turbina com relação à direção dos ventos.

- Perfil: está relacionado com o desenho da borda da pá, sendo um parâmetro de grande importância, já que o rendimento do rotor depende deste perfil. Em estudo realizado por Hulscher *et al.* (1994), comprovou-se que o perfil de asa de avião proporciona um empuxo máximo e resistência mínima, que é muito útil para a construção das pás.
- Ângulo de ataque: escolhidos o perfil e a velocidade típica do rotor, se determina esse fator, que permite obter a potência ótima e também utilizá-lo como sistema de regulação.
- Espessura: não intervém na potência de saída da turbina eólica (que depende da área varrida pelas pás) mas no arranque (partida). Com pás mais estreitas e finas se consegue uma velocidade de rotação maior, ao passo que com pás mais espessas se consegue uma velocidade menor, porém com torque de partida maior.

Desta forma, a construção de pás para aerogeradores deve ser um resultado da integração entre estes fatores. Destaca-se que, com o estágio atual da tecnologia, não reside na aerodinâmica a dificuldade de fabricação do rotor mas sim na construção e resistência dos materiais que compõem as pás. Esses devem responder às diferentes exigências (esforços) da máquina eólica e que o conjunto material seja resistente, rígido, leve e de mínimo custo.

As perdas na transmissão estão diretamente ligadas ao atrito que existe entre as engrenagens. Em velocidades de giro fixas, as perdas variam pouco com o par de transmissão então assume-se que as perdas são uma porcentagem fixa da potência nominal. Esta porcentagem real depende da qualidade da transmissão mas um valor razoável pode ser em torno de 2 % da potência em cada etapa de engrenamento³⁷. Como a transmissão consome uma certa quantidade de energia, as perdas podem ser consideráveis em baixas potências, já que o rendimento nestes casos é menor (Johansson *et al.*, 1993).

As perdas no gerador podem ser classificadas em três categorias: (i) histerese³⁸ e perdas no fluxo (que são funções da frequência e tensão de trabalho); (ii) resistência aerodinâmica e perdas por atrito (que variam com a velocidade de giro); (iii) perdas no cobre, que variam com o quadrado da corrente de saída.

³⁷ Normalmente são requeridas duas ou três etapas de engrenamento.

³⁸ Perdas por magnetização.

É adequado classificar as perdas em dois tipos: fixas (histerese, corrente de Foucault³⁹, resistência aerodinâmica e atrito) e variáveis (perdas no cobre). A magnitude das perdas varia com o gerador porém, na potência nominal de um gerador eficaz, é aconselhável que as perdas fixas sejam aproximadamente iguais às variáveis (WEG, 2001).

Os geradores de maiores potências possuem uma melhor eficiência que os menores, pois a relação entre volume e área aumenta ao incrementar o tamanho (físico) do gerador. Algumas perdas (Foucault e histerese) são proporcionais à área do rotor enquanto que a potência elétrica nominal é proporcional ao volume. Geradores de qualidade podem ter rendimentos variáveis para diversas potências, sendo comum encontrar os valores da tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Rendimento dos geradores em função da potência

Potência (kW)	Eficiência
2	0,85
20	0,90
200	0,93
Potências maiores e plantas nucleares	0,96

Fonte: WEG (2001)

4.1.4. Fatores que influenciam o desempenho dos aerogeradores

Desde 1970, a tecnologia presente nos sistemas eólicos, principalmente na fabricação de aerogeradores, vem crescendo mais do que qualquer outra (Gipe, 1995). É expressível a contribuição das turbinas eólicas que geram quantidades comerciais de eletricidade, auxiliando outras fontes de geração e, em alguns casos, a energia eólica acaba se tornando a única fonte de eletricidade para suprir a demanda de energia elétrica de comunidades.

Porém, para que a geração de eletricidade a partir do movimento do ar seja possível e atraente, tanto técnica quanto economicamente, alguns fatores são determinantes. O valor da energia produzida varia com o cubo da velocidade dos ventos, o que significa que a potência de

³⁹ As correntes de Foucault, ou correntes parasitas, são responsáveis pela diminuição do fluxo do gerador.

saída é altamente sensível a este fator: um aumento de 10% no mesmo acarreta em 33% a mais de energia disponível.

Desta forma, a velocidade dos ventos é o fator mais crítico na determinação da energia que pode ser obtida de um aerogerador e também seu custo. Além deste, outros fatores como altura da torre, altitude e superfície também são importantes e serão discutidos nesta seção.

Altura de torre

O posicionamento da torre para a geração de eletricidade deve ter três aspectos a serem considerados na escolha definitiva do local de montagem: topografia, barreiras e superfície.

Topografia

O ar normalmente é mais frio durante a noite e tende a ocupar as regiões próximas ao solo e produzir pouca quantidade de vento, um dos motivos do posicionamento da torre em áreas mais elevadas. Para a escolha destes locais devem ainda ser observados aspectos como: facilidade de locomoção até a instalação, proximidade ao ponto de consumo, espaço necessário para manutenções e evitar áreas muito frias (geadas, neve), pois condições climáticas adversas podem prejudicar e danificar o aerogerador.

Barreiras naturais

Podem ser tratadas como barreiras naturais: prédios, árvores, plantações e construções elevadas que, quando estão na direção do vento que passa pelo aerogerador, causam uma diminuição da velocidade do vento e turbulência, danificando o equipamento.

Superfície

Dependendo do tipo de vegetação encontrada, é importante o posicionamento do aerogerador a maiores alturas: quanto mais acidentado o terreno (maior rugosidade), com plantações, construções, árvores, etc. mais alta a torre deve ser.

Os dados de velocidade do vento normalmente vêm acompanhados com a altura na qual ocorreu a medição. Quando esta não vem especificada, a velocidade refere-se à altura padrão internacional de 10 metros acima do solo ou à altura em que cada aerogerador está operando.

Porém, existem duas formas de aproximação para estimar a velocidade do vento de acordo com a altura: a Lei da Potência (*Power Law Method*), comum na América do Norte e a Lei Logarítmica, comum na Europa.

A Lei da Potência é o modelo mais simples, resultado de estudos da camada limite sobre uma placa plana. Esse modelo apresenta uma vantagem na sua fácil utilização, entretanto, os resultados obtidos não possuem precisão adequada (Johansson *et al.*, 1993). A Lei da Potência é expressa por:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (4.15)$$

onde:

$V(z)$: velocidade na altura desejada z (m/s);

$V(z_r)$: velocidade na altura de referência z_r (m/s);

z : altura desejada (m);

z_r : altura de referência (m);

α : fator diretamente associado à rugosidade da superfície (Tab. 4.3).

Tabela 4.3 - Valores típicos de α

Terreno	α
Superfície lisa, lago, gelo ou oceano	0,10
Gramma baixa	0,14
Vegetação rasteira (até 0,3 m)	0,16
Arbustos, árvores ocasionais	0,20
Árvores, construções ocasionais	0,22 - 0,24
Áreas residenciais e florestas	0,28 - 0,40

Fonte: Gipe (1995); Hirata (1985).

Pode-se perceber o efeito da superfície na velocidade dos ventos na Fig. 4.1. Duplicando-se a altura (50 para 100 metros), tem-se um aumento aproximado de 10% na velocidade dos ventos, para um valor de α igual a 0,1.

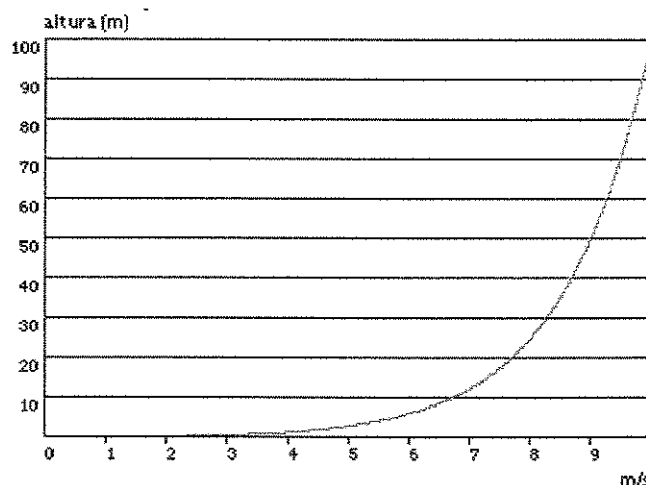


Figura 4.1 - Aumento da velocidade dos ventos com a altura (para α igual a 0,1).

Fonte: DWTMA (1995).

A Lei Logarítmica é um modelo mais complexo onde é considerado o fato de que o escoamento na atmosfera é altamente turbulento. A modelagem do Perfil Logarítmico utiliza o conceito do comprimento de rugosidade do local, z_0 , que considera que a superfície da Terra nunca se apresenta perfeitamente lisa (Johansson *et al.*, 1993).

O modelo do Perfil Logarítmico é freqüentemente utilizado para estimar a velocidade do vento em uma altura a partir de uma altura de referência. Pode-se determinar a velocidade de vento em uma determinada altura a partir de duas expressões de perfil logarítmico: uma para a altura de referência (z_r) e outra para a altura desejada (z). Essa equação torna-se mais precisa ao considerar a rugosidade em cada expressão logarítmica das alturas z e z_r . O modelo do Perfil Logarítmico pode ser visto na Eq. 4.16:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (4.16)$$

O parâmetro z_0 é definido por uma escala de comprimento utilizada para caracterizar a rugosidade do terreno. É importante ressaltar que o comprimento de rugosidade z_0 deve ser considerado como um parâmetro temporal, uma vez que está diretamente associado às mudanças naturais da paisagem. Essas mudanças podem ser observadas (e devem ser levadas em consideração) no perfil de vento em um campo de colheita. Nesse caso, a rugosidade muda significativamente (dependendo do tipo de cultivo) entre o período de plantação, crescimento e colheita. Na Fig. 4.2 é mostrada uma tabela com os valores de rugosidade de superfície pré-definidos além de figuras de paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu como classificadores das quatro classes de rugosidade.

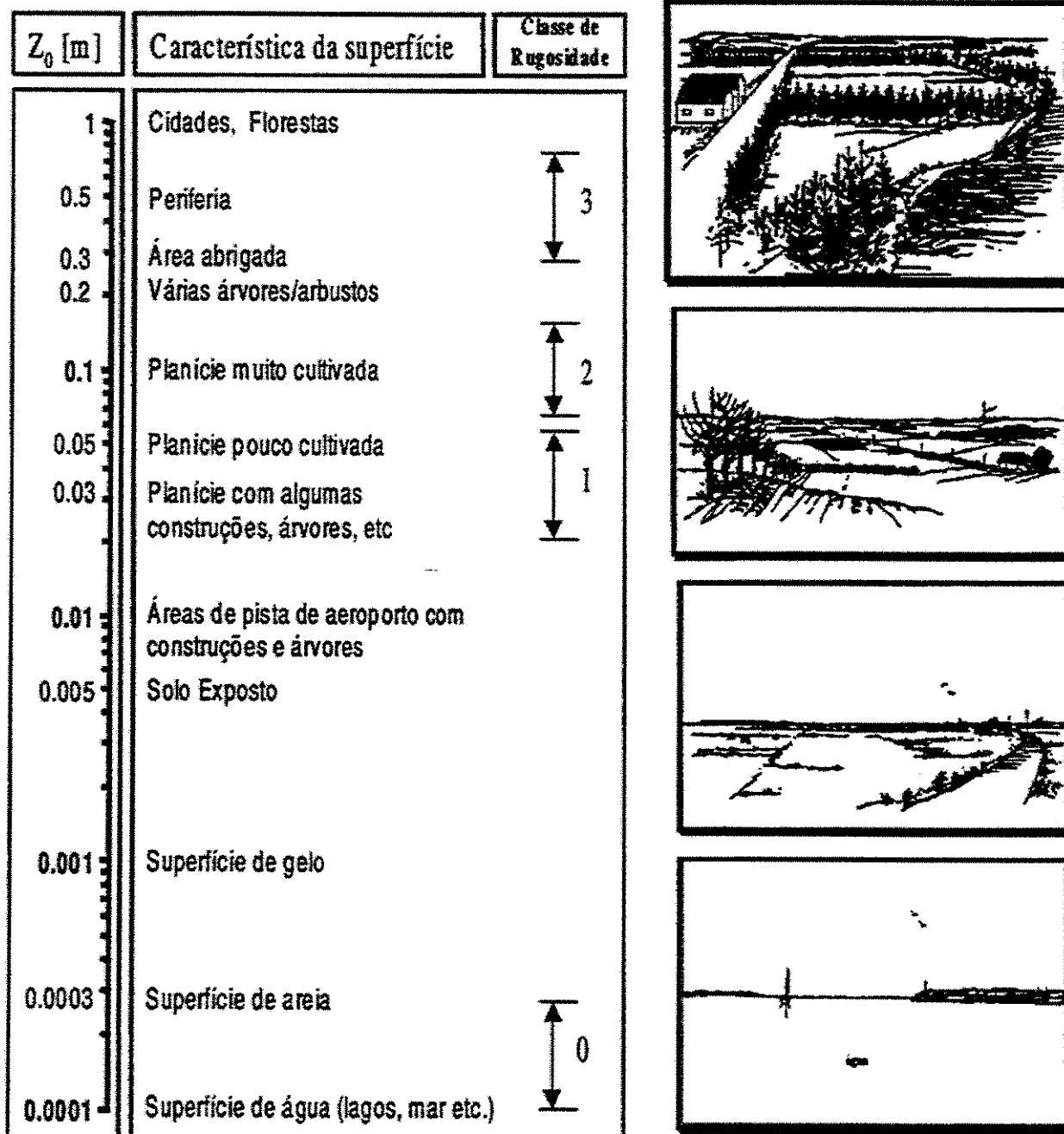


Figura 4.2 – As classes de rugosidade e as paisagens adotadas pelo Atlas Eólico Europeu.

Fonte: Mortensen (1993).

Altitude

Muitos fatores tendem a aumentar a velocidade dos ventos em maiores altitudes: primeiro, a atmosfera é menos densa, o que proporciona elevada força direta⁴⁰; segundo, existem maiores efeitos da força direta em terrenos montanhosos; e terceiro, em maiores altitudes o terreno tende a ter menos obstáculos (Johansson *et al.*, 1993).

Tipicamente, existe um aumento de 5 a 10% nas velocidades do vento a cada 100 metros acima do nível do mar (Holt *et al.*, 1989; Johansson *et al.*, 1993) (Fig. 4.2). Porém, com o aumento da altitude, ocorre a redução da densidade do ar, diminuindo a energia nos ventos para uma escala menor; para manter-se a mesma energia, a velocidade deve aumentar em torno de 3% a cada 1000 metros (Elliot *et al.*, 1986).

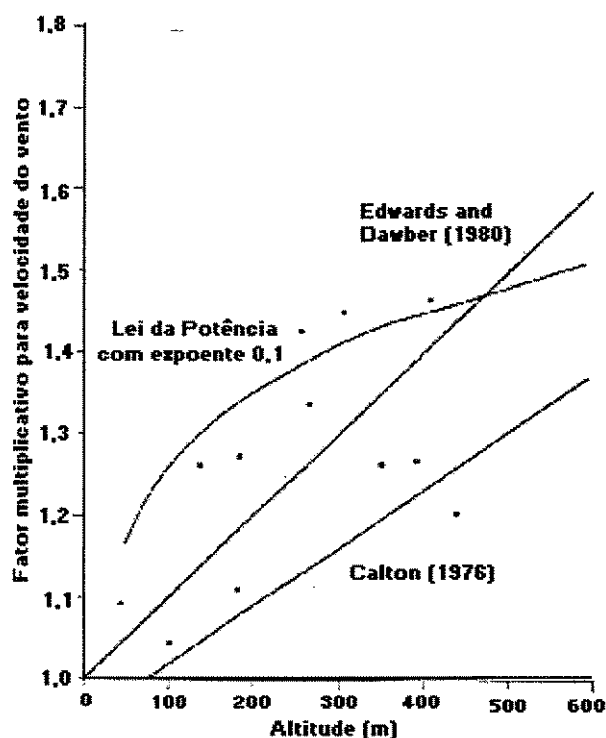


Figura 4.3 - Aumento da velocidade dos ventos com a altitude.

Fonte: Johansson *et al* (1993).

⁴⁰ A força direta ou *direct driving force* é a força que age paralelamente ao eixo das pás do aerogerador.

A altitude também influencia a densidade do ar, a qual é diretamente proporcional à pressão e inversamente proporcional à temperatura e à constante dos gases (Eq. 4.4). As Figs. 4.4 e 4.5 apresentam a relação da densidade do ar com a temperatura e com a altitude respectivamente.

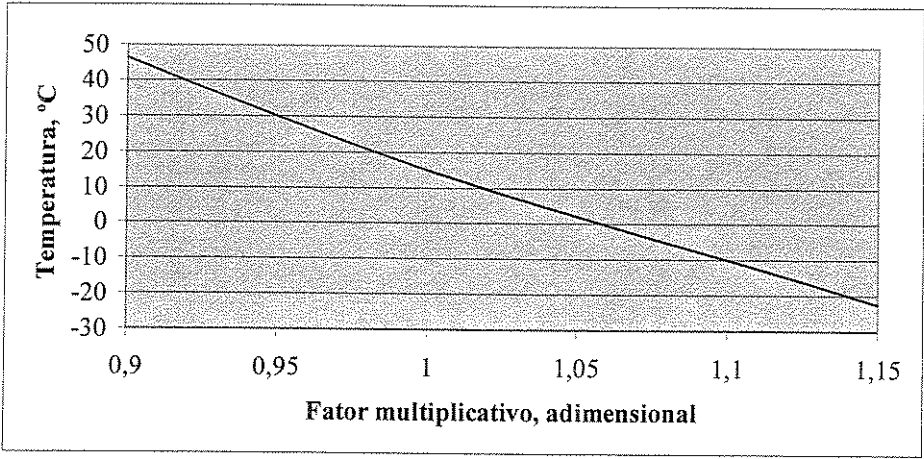


Figura 4.4 - Relação entre densidade do ar e temperatura.

Fonte: Gipe (1995).

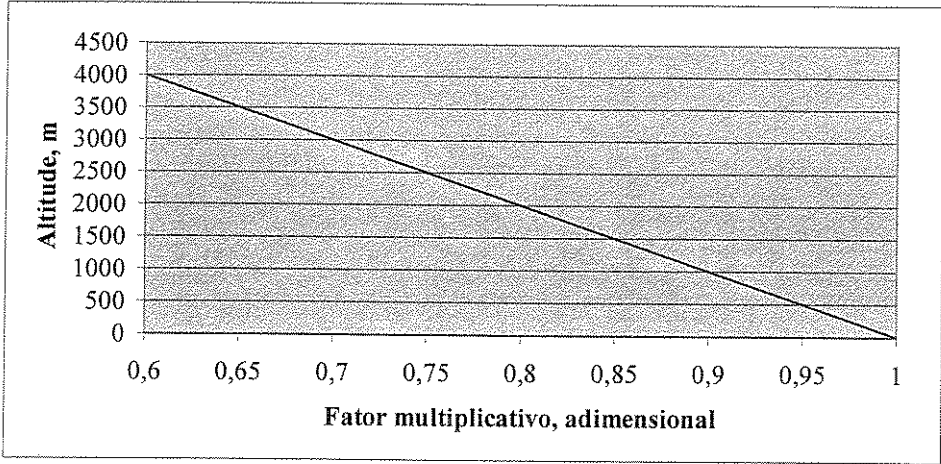


Figura 4.5 - Relação entre densidade do ar e altitude.

Fonte: Gipe (1995).

Conforme verificado nesta seção, vários fatores influenciam a geração de eletricidade a partir dos ventos e cada projeto deve ser realizado de forma a atingir as vantagens técnicas e econômicas de aerogeradores, de acordo com o local da instalação.

4.2. Representação estatística do regime dos ventos

Com as variações climáticas sendo freqüentes a cada período do ano, a velocidade do vento também varia seu perfil ao longo do ano. Essa variação faz com que os dados de vento sejam medidos durante vários períodos, para que seja feita uma análise mais confiável de seu regime. As grandezas estatísticas mais utilizadas na determinação do regime dos ventos são a velocidade média \bar{V} e o desvio padrão σ .

Com o objetivo de selecionar uma turbina eólica ou comparar várias regiões do país através de parâmetros estatísticos, tais como velocidade média e desvio padrão, o uso de tabelas de freqüência e de representações gráficas (histogramas) torna-se pouco prático. Dessa forma, é necessário armazenar os dados de uma forma compacta. Na prática, os dados de vento sofrem um tratamento estatístico adequado e, por comodidade, adota-se o procedimento de armazená-los na forma de expressões analíticas, conhecidas como distribuições de probabilidades, que fornecem a probabilidade de ocorrência de ventos com velocidade V .

Para fins de utilização prática, a função densidade de probabilidade $g(V)$ deve satisfazer a dois requisitos básicos:

- O gráfico gerado deve representar, de maneira mais aproximada possível, o histograma de velocidades;
- A função de probabilidade deve ser de fácil associação ao regime dos ventos que se deseja simular.

Em geral, o segundo requisito leva à necessidade de definir $g(V)$ em função de grandezas estatísticas, tais como a velocidade média e o desvio padrão. Dos vários testes feitos na utilização de modelos probabilísticos para ajustar as curvas de freqüência de velocidade foi possível associar uma distribuição de probabilidade à curva de freqüência de velocidades, cujas propriedades podem ser deduzidas matematicamente. Das diversas distribuições estatísticas testadas, as distribuições de Weibull e Rayleigh são as mais utilizadas para a representação dos dados de vento (Rohatgi *et al*, 1994).

4.2.1. Distribuição de Weibull

Uma vez que a intensidade dos ventos não é constante, para se determinar a energia produzida pelos ventos durante um certo intervalo de tempo é necessário realizar um tratamento nos dados que os representam, de forma a estratificar as velocidades e as frequências em que eles ocorreram (histograma de velocidade). Em outras palavras, é necessário saber quantas vezes, durante o intervalo de tempo medido, ocorreram ventos de 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s e assim por diante.

A distribuição de Weibull é o método mais utilizado para se realizar o tratamento estatístico de histogramas relativos ao comportamento dos ventos além, também, de ser amplamente utilizado pela maioria dos programas computacionais que estimam a produção anual de energia (Silva, 1999).

A distribuição de Weibull é normalmente representada na forma de k e c , onde:

k = fator de forma da distribuição dos ventos;

c = fator de escala que depende da velocidade média dos ventos.

Para determinadas localidades e em certos períodos do ano, a distribuição de Weibull ajusta-se razoavelmente bem ao histograma de velocidade, apresentando melhores resultados do que aqueles fornecidos pela distribuição de Rayleigh⁴¹. A função densidade de probabilidade de Weibull é dada por:

$$g(V) = \left(\frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \right) \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right] \quad (4.17)$$

Como descrito anteriormente, a distribuição de Weibull é, portanto, uma distribuição a dois parâmetros: um parâmetro de escala (c) relacionado com o valor da velocidade média, e o parâmetro de forma (k) que é adimensional e fornece a indicação da uniformidade da distribuição e a forma da curva de Weibull. A Fig. 4.8 mostra a influência do parâmetro de forma k na curva de distribuição de Weibull.

⁴¹ A distribuição de Rayleigh está na seção 4.2.2.

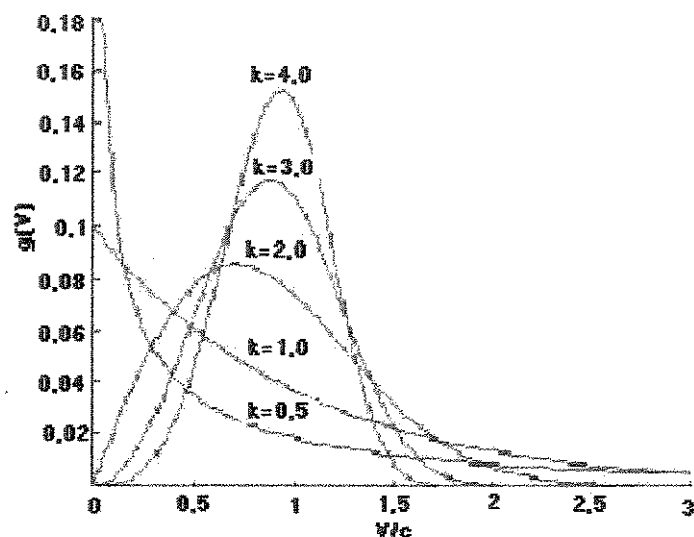


Figura 4.6 – Influência do parâmetro k na curva de distribuição de Weibull.

Fonte: Silva (1999).

A distribuição de Weibull reduz-se à distribuição de Rayleigh quando $k = 2$ com o parâmetro de escala assumindo o valor:

$$c = \frac{2 \cdot \bar{V}}{\sqrt{\pi}} \quad (4.18)$$

Vários métodos podem ser utilizados para estimar os parâmetros da distribuição de Weibull c e k , dependendo dos dados de vento disponíveis e do rigor requerido na análise. Silva (1999) e Rohatgi (1994) mostram métodos mais rigorosos para se obter os parâmetros de Weibull sob várias condições de dados disponíveis.

Estudos demonstram que se obtém resultados mais precisos a partir do método que utiliza a velocidade média e o desvio padrão como grandezas estatísticas as quais estão relacionadas com os parâmetros c e k através das expressões (Araújo, 1999):

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \left(\frac{1}{k}\right)\right)} \quad (4.19)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{V}} \right)^{-1,086} \quad (4.20)$$

onde Γ é a função gama de argumento

$$\left(1 + \left(\frac{1}{k} \right) \right) \quad (4.21)$$

4.2.2. Distribuição de Rayleigh

A função densidade de probabilidade de Rayleigh fica definida apenas com o conhecimento da velocidade média e representa bem os regimes de vento que apresentam velocidades moderadas (4 – 8 m/s). A função densidade de probabilidade de Rayleigh é dada pela expressão:

$$g(V) = \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{V}{\bar{V}^2} \right) \left[\frac{-\pi \left(\frac{V}{\bar{V}} \right)^2}{4} \right] \quad (4.22)$$

onde \bar{V} é a velocidade média do vento.

A conveniência da utilização da distribuição de Rayleigh é devido a sua simplicidade. Entretanto, essa é também a responsável pelas suas limitações, uma vez que não permite representar muitas situações práticas de interesse, especialmente quando as velocidades de vento são altas. A Fig. 4.7 mostra a influência da velocidade média na curva de distribuição de Rayleigh.

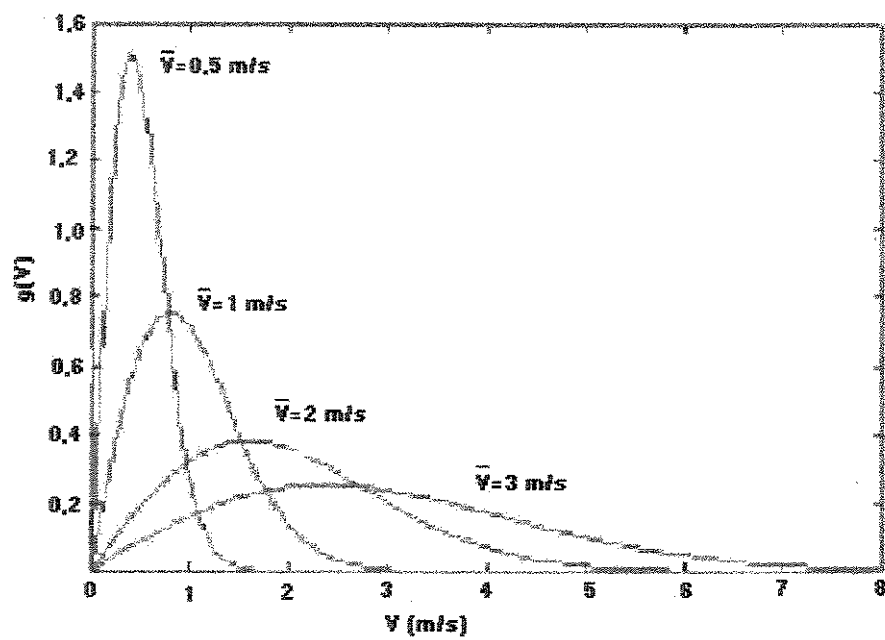


Figura 4.7 – Influência da velocidade média na distribuição de Rayleigh.

Fonte: Silva (1999).

Capítulo 5

Descrição do Projeto

Para concretizar o objetivo deste estudo, montou-se um projeto⁴² com um pequeno aerogerador. Este projeto, montado na UNICAMP, ajudou a adquirir informações a respeito deste sistema de energia eólica de baixa potência, demonstrando suas potencialidades e enfocando principalmente sua eficiência. Objetiva-se também investigar a sazonalidade do desempenho de aerogeradores neste local, através de um experimento científico.

O principal objetivo é determinar a eficiência do sistema instalado, bem como verificar o desempenho sazonal da tecnologia eólica, o qual vem sendo monitorado com vistas à obtenção de resultados da taxa de desempenho (considerada aqui como o quociente entre a energia total efetivamente produzida e a energia total disponível nos ventos). Estes resultados são comparados com os projetos similares conhecidos no mundo.

Outro objetivo deste projeto montado é a disseminação da energia eólica em geral e de instalações eólicas interligadas à rede elétrica e integradas à paisagem. Sabe-se que o uso da energia eólica vem crescendo, não apenas por questões econômicas mas também como disseminação de informação e conhecimento das aplicações potenciais deste tipo de energia, à qual uma maior gama de projetos deveria ser destinada. Por se localizar no campus de uma

⁴² O projeto está em funcionamento desde Abril/2001.

universidade com reconhecimento internacional, os pontos mencionados são demonstrados para uma parcela considerável de estudantes universitários.

5.1. Equipamentos utilizados

Tem-se como ponto de partida a instalação eólica de 500 W, composta por um aerogerador de duas pás, instalado nas dependências da Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI), na UNICAMP. Esta instalação é continuamente monitorada por um sistema de aquisição de dados dedicado.

Além do aerogerador, ainda fazem parte deste sistema uma estação meteorológica⁴³ com sensores de radiação solar, velocidade e direção dos ventos e temperatura; sistemas de aquisição de dados – um para os dados meteorológicos e outro para os valores de tensão e corrente fornecidos pelo aerogerador, um controlador de carga e um sistema de armazenamento composto por baterias. Esta configuração é a utilizada neste projeto, porém o sistema completo apresenta um inversor CC/CA e uma pequena carga, fundamentado em um sistema híbrido solar/eólico conectado à carga. O diagrama esquemático da instalação pode ser visto na Fig. 5.1.

Com exceção do aerogerador, os demais componentes foram instalados em um cubículo⁴⁴. Neste, o sistema de aquisição foi acondicionado em um painel metálico de porta frontal com dois fechos simples com 1000 x 500 x 500 mm de altura, largura e profundidade respectivamente. O banco de baterias foi colocado ao lado do painel de medição. O cubículo e o painel metálico estão na Fig. 5.2.

⁴³ Esta estação foi instalada em meados de Dezembro/2001 e seus dados não foram utilizados neste projeto.

⁴⁴ O cubículo foi construído em blocos, tendo 2 x 2 x 1 m de altura, largura e profundidade respectivamente.

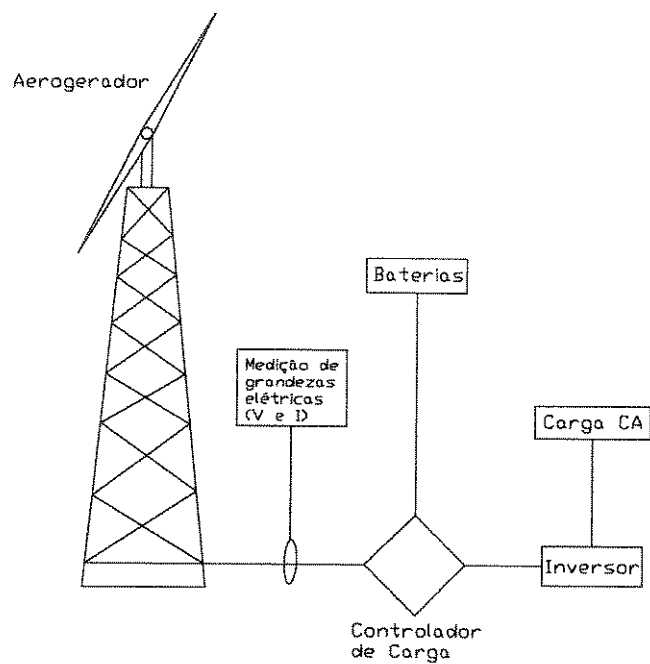


Figura 5.1 – Diagrama esquemático da instalação eólica

Fonte: Elaboração própria

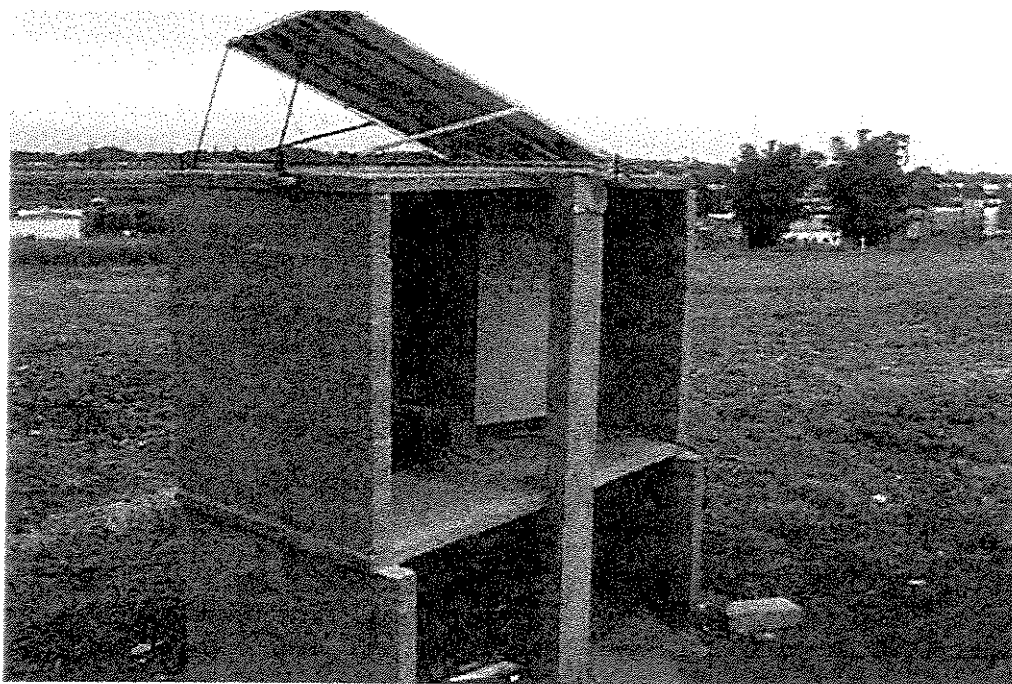


Figura 5.2 – Foto do cubículo e do painel que abriga os componentes do sistema

Esse painel foi fixado na parede interna do cubículo levantado na FEAGRI com chumbadores. O aerogerador foi posicionado a 2 metros do cubículo, a 6 metros de altura, colocado sobre uma torre chumbada em uma base quadrada de concreto com 30 cm de lado, sendo conectado ao controlador de carga por cabos paralelos 2x6 mm². A Fig. 5.3 mostra uma foto do local da instalação.



Figura 5.3 – Foto do local da instalação

A lista dos equipamentos utilizados, com as suas especificações, está na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 – Equipamentos utilizados no projeto

Aerogerador	
Fabricante	South West Windpower
Modelo	Windseeker 500
Potência	500 watts
Pás	2
Diâmetro do Rotor	1,52 metros
Tensão	12 volts (corrente contínua)
Tensão máxima de trabalho	14,8 volts (corrente contínua)
Velocidade de <i>start-up</i>	2 m/s
Acumuladores (Baterias)⁴⁵ – 4 baterias	
Fabricante	Dinasty
Tipo	Chumbo-ácido
Características	100 Ah, 12 volts
Sistema de aquisição de dados (<i>data logger</i>)	
Fabricante	Pacific Science and Technology
Modelo	Energy Logger
Características	4 entradas analógicas
Tensão de entrada	± 5 volts (corrente contínua)
Controle da carga	
Fabricante	Trace Engineering
Características	12 volts, 30 ampère
Acessórios	
Painel metálico 1000 x 500 x 500 mm	
Fios e cabos elétricos	

⁴⁵ Utilizado o mesmo sistema de Camargo (2000).

5.2.Dados utilizados

Os dados de velocidade instantânea dos ventos utilizados neste trabalho foram os disponibilizados pelo Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura (Cepagri) da UNICAMP, referentes aos anos de 1997 a 2001. Estes dados são os registros diários, a cada dez minutos, a uma altura de cinco metros, da estação meteorológica de coleta dos dados⁴⁶, localizada na FEAGRI.

Utilizou-se ainda da série histórica de velocidade dos ventos coletada pelo IAC (medições a 10 metros de altura), na Fazenda Santa Elisa, para comparar com os dados do Cepagri. Esta série, apresentada no Apêndice 5, contém as médias mensais de velocidades de vento para o período de 1956 a 2000.

Do sistema montado, foram coletados, com o *data logger*, os dados de tensão e corrente fornecidas pelo aerogerador a cada cinco minutos, entre os meses de Abril e dezembro de 2001.

5.3.Metodologia de trabalho

Para os dados do Cepagri, de 1997 a 2001 e a média histórica do IAC encontrou-se, para cada bloco de dados, os valores da velocidade média dos ventos e o desvio padrão com a utilização do Excel, para que pudessem ser calculados os parâmetros k e c da distribuição de Weibull, utilizando-se do software⁴⁷ do RERL.

Para o ano de 2001, nos meses compreendidos entre Abril e Dezembro, a partir dos dados coletados com o *data logger* (tensão, V e corrente, I), foi calculada a energia diária fornecida pelo sistema (E), a partir da Eq. 5.1 e 5.2, somando-se a energia fornecida a cada cinco minutos.

⁴⁶ Estação automática de coleta de dados da Campbell Scientific, modelo CR10, com contrato de manutenção firmado com a FUNCATE - Fundação de Ciências e Aplicações e Tecnologia Espacial de São José dos Campos.

⁴⁷ O *Renewable Energy Research Laboratory* (RERL) da universidade de Massachusetts existe para promover a educação e a pesquisa em tecnologia de conversão para as energias eólica e solar. Foi fundado pelo *Massachusetts Division of Energy Resources* e pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). O RERL criou o software *Wind Energy Engineering Toolbox of Mini-Codes* (WEETMC), na versão 1.01 de 1999, utilizado neste trabalho. É uma ferramenta de auxílio pois tem em suas características a função de distribuição de Weibull já implementada (NREL, 2000).

$$P = VI \quad (5.1)$$

$$E = Pt = VIt \quad (5.2)$$

onde:

P = potência (W)

t = tempo (em horas)

Comparou-se a energia diária fornecida pelo sistema com a energia cinética contida nos ventos, calculada com os dados do Cepagri para o mesmo período (Eq. 4.2), encontrando a eficiência do sistema. Para a energia mensal e anual, somou-se os dados diários.

Existem diferentes maneiras de definir eficiência, uma delas é a que expressa o desempenho de sistemas quando instalados, sendo definida por:

$$Eficiência = \frac{Energia\ produzida\ (Wh)}{Energia\ contida\ nos\ ventos\ (Wh)} \quad (5.3)$$

Ainda para o ano de 2001, a partir dos dados do Cepagri, foi calculada a velocidade média mensal e regime dos ventos (foi elaborada uma média simples de cada hora do dia ao longo do mês⁴⁸), e comparou-se as velocidades médias encontradas com as fornecidas pelo IAC para o ano de 2000.

A seguir apresenta-se o fluxograma da metodologia utilizada neste trabalho, com as equações e dados em cada etapa.

⁴⁸ A primeira hora do dia 1, soma-se com a do dia 2 e assim por diante e obtém-se a média e utiliza-se da mesma metodologia para as outras horas.

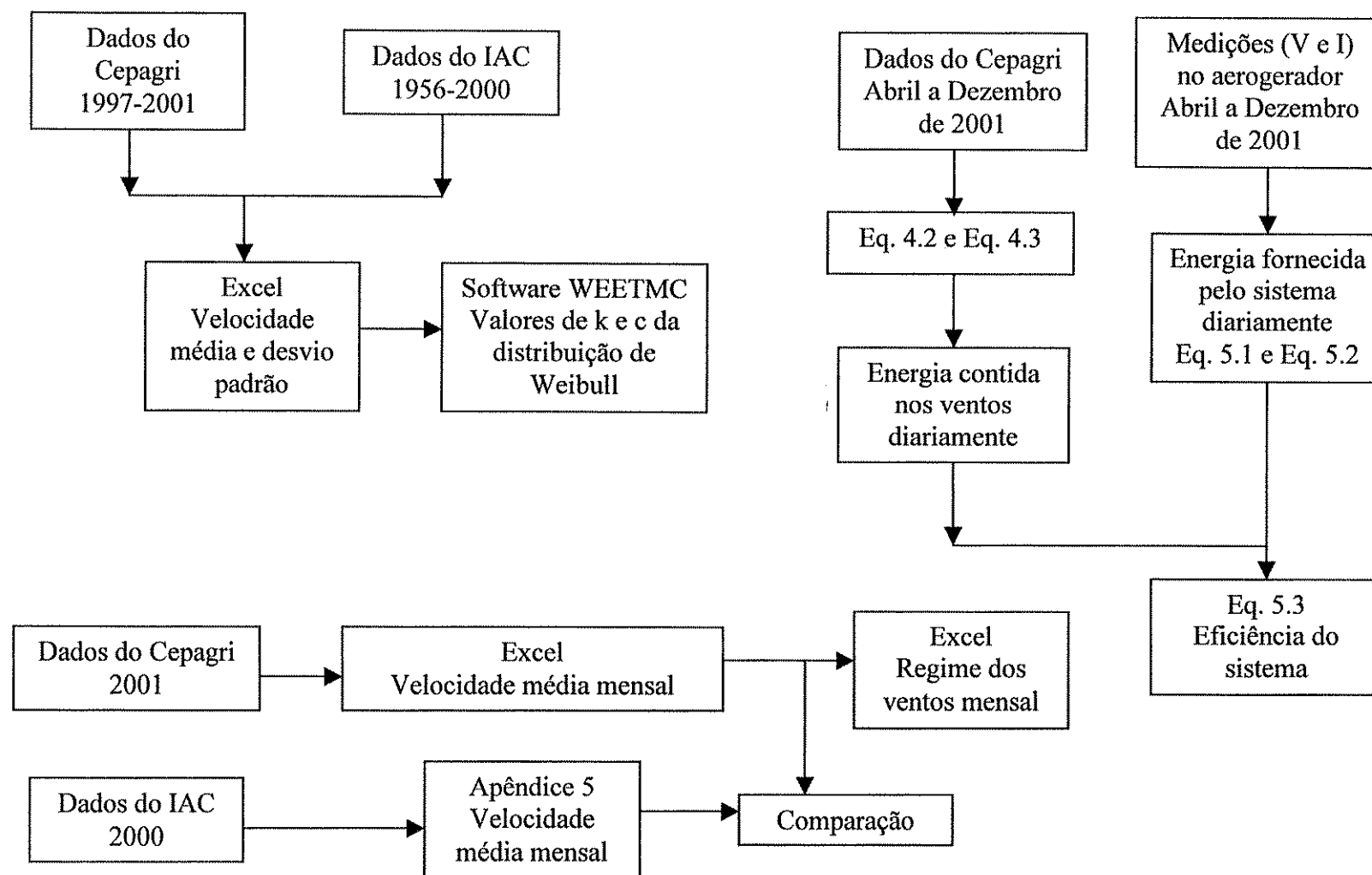


Figura 5.4 – Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho

Capítulo 6

Apresentação e Análise dos Resultados Obtidos

Este capítulo apresenta os dados coletados e analisados para o projeto, dentro de cada etapa e com a utilização da ferramenta própria, como descrita no capítulo 5.

6.1. Regime dos ventos

Os gráficos apresentados a seguir mostram o regime dos ventos encontrado para o ano de 2001, de acordo com os dados trabalhados do Cepagri.

Figura 6.1 – Regime de ventos para o ano de 2001

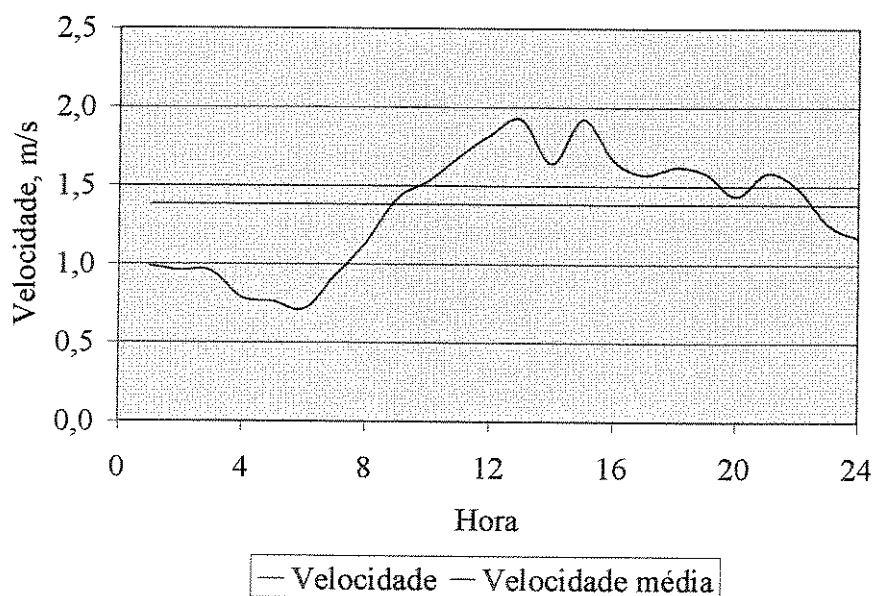


Figura 6.1-a – Janeiro de 2001

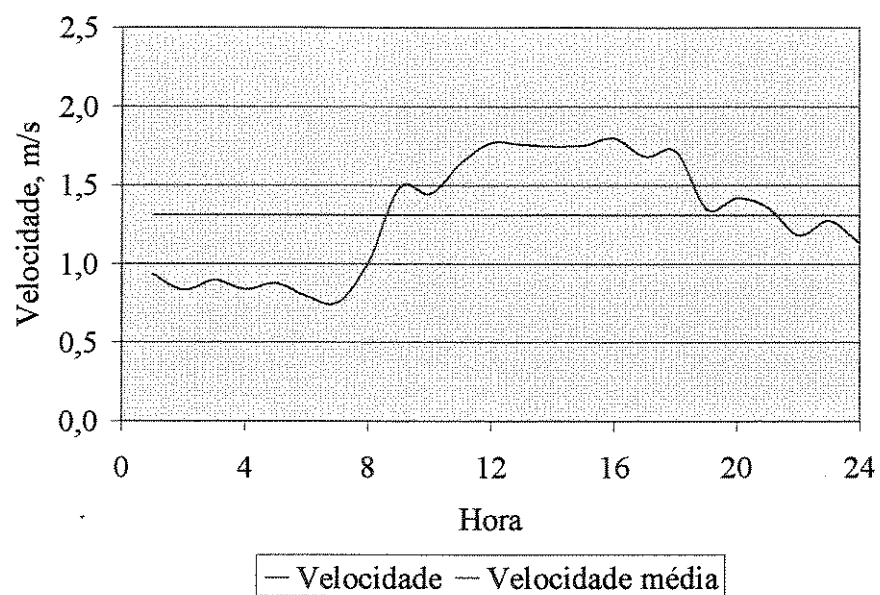


Figura 6.1-b – Fevereiro de 2001

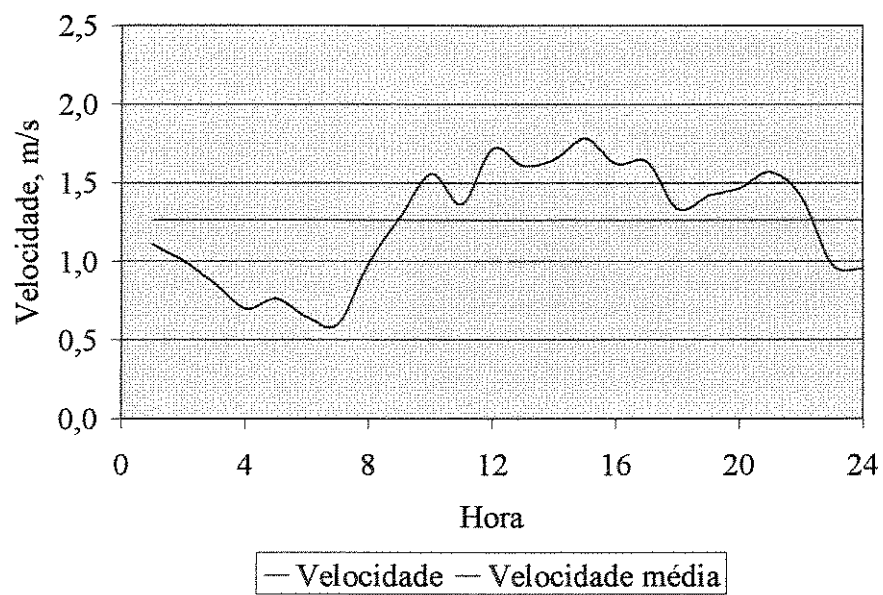


Figura 6.1-c – Março de 2001

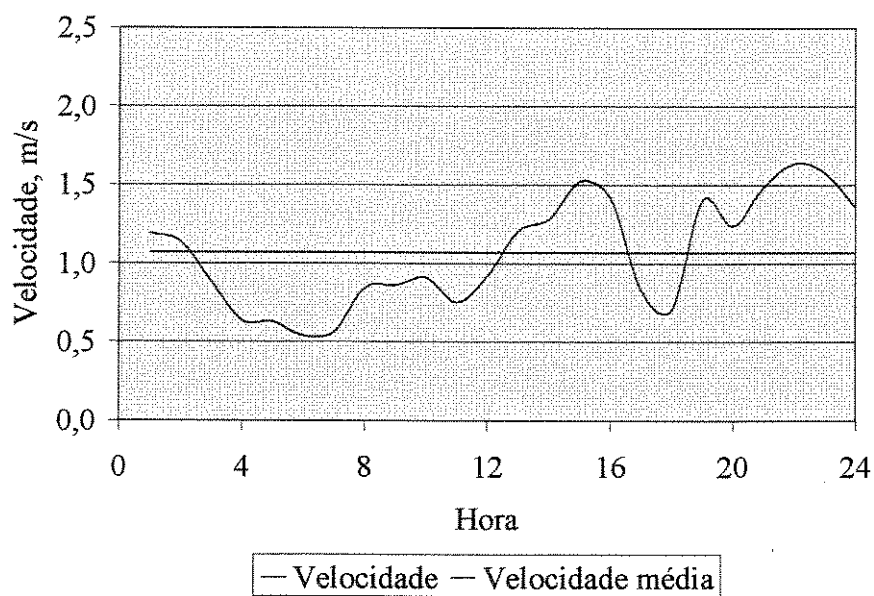


Figura 6.1-d – Abril de 2001

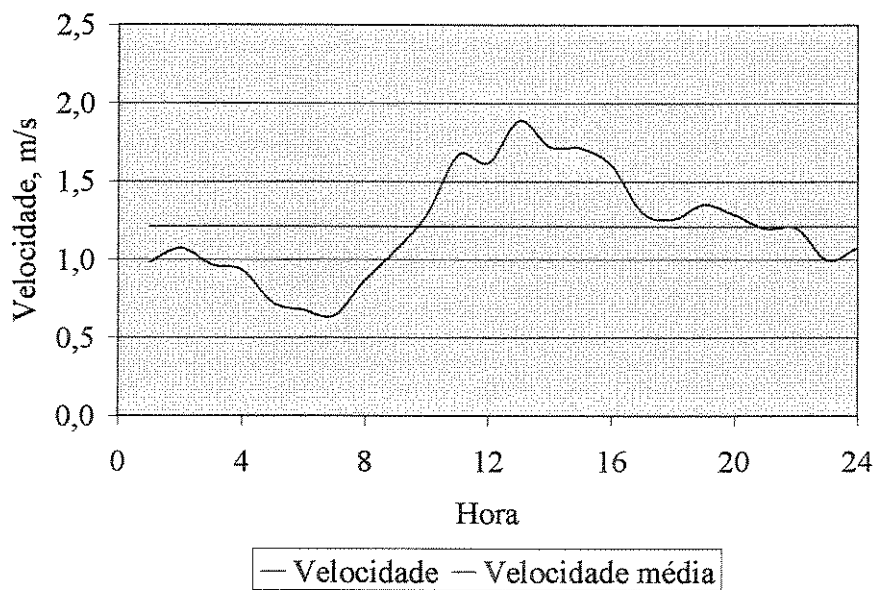


Figura 6.1-e – Maio de 2001

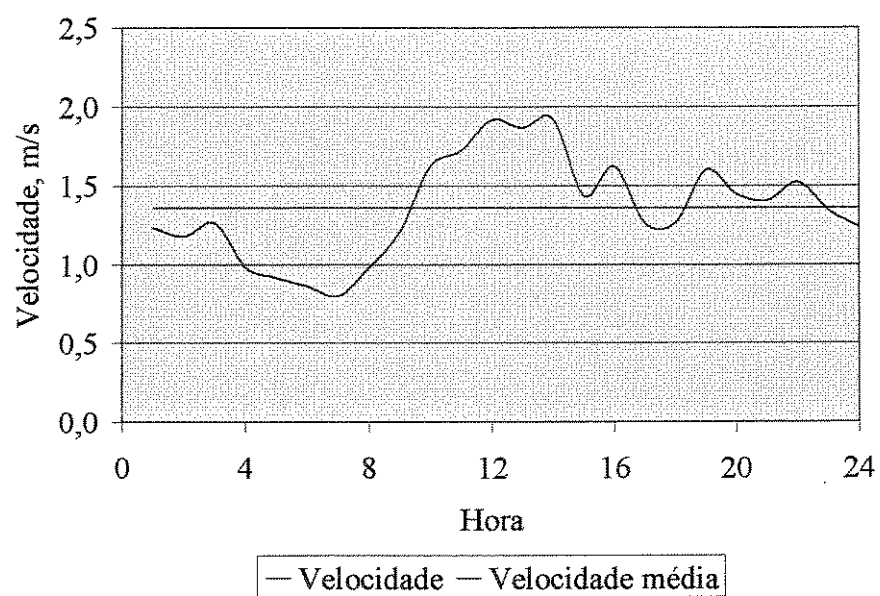


Figura 6.1-f – Junho de 2001

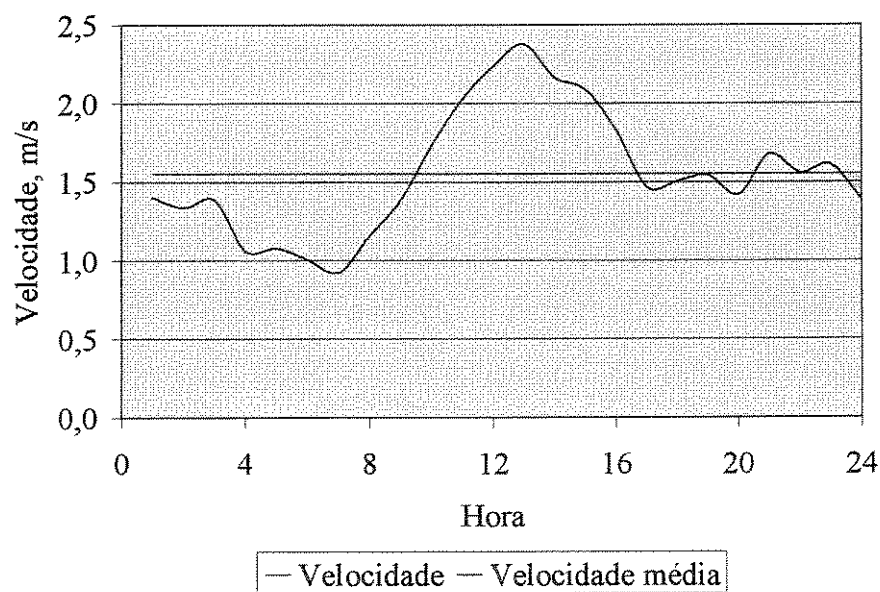


Figura 6.1-g – Julho de 2001

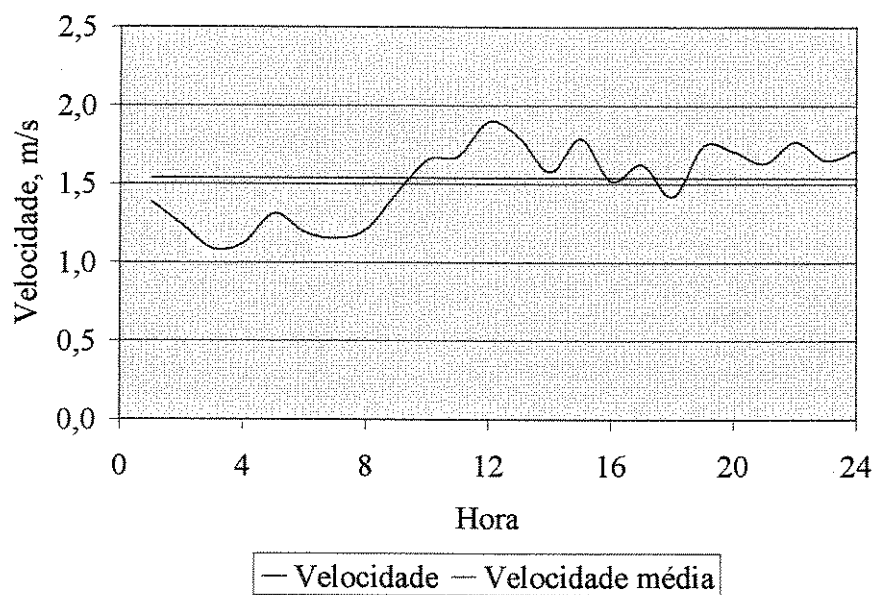


Figura 6.1-h – Agosto de 2001

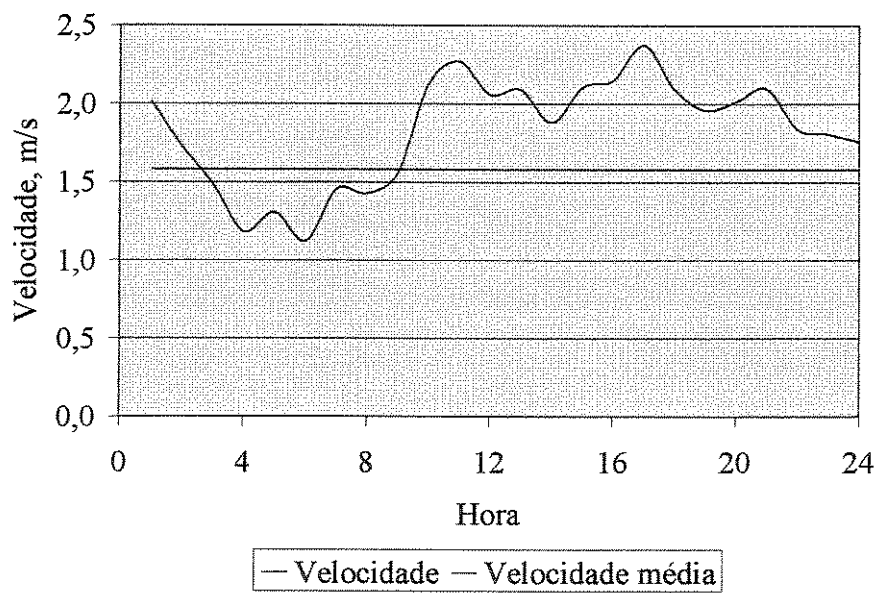


Figura 6.1-i – Setembro de 2001

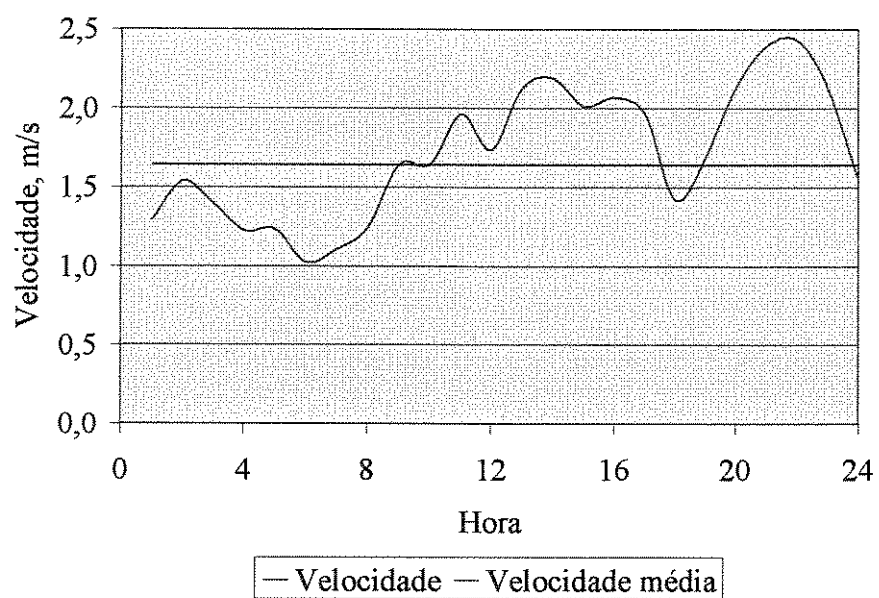


Figura 6.1-j – Outubro de 2001

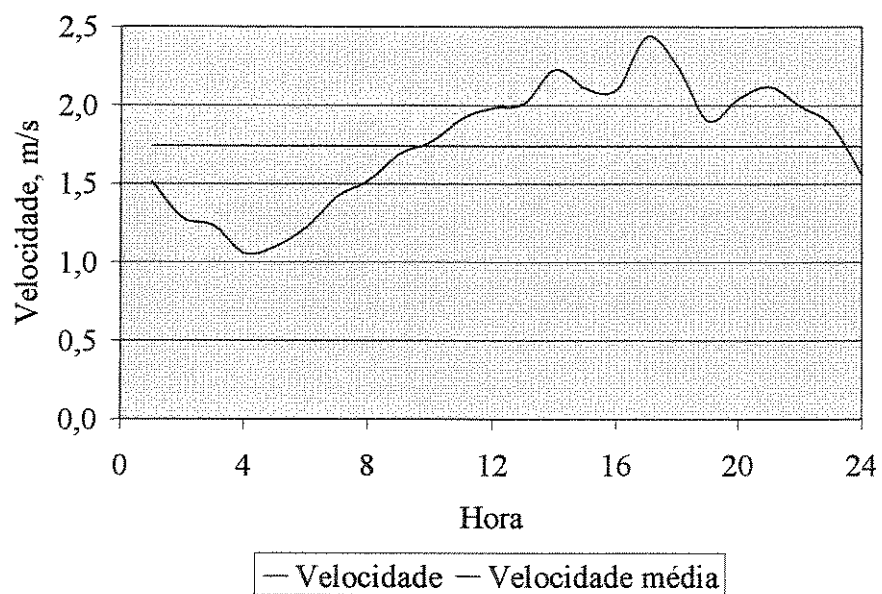


Figura 6.1-k – Novembro de 2001

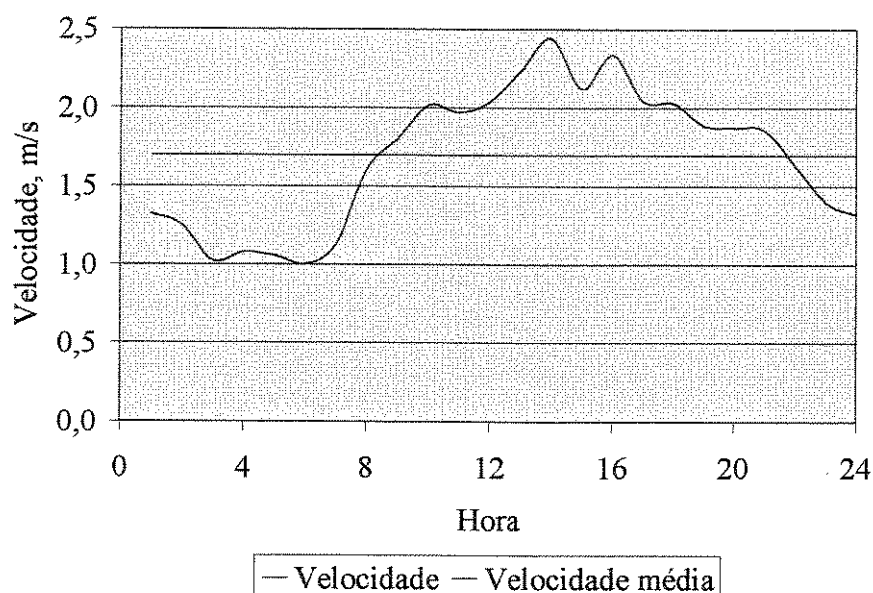


Figura 6.1-1 – Dezembro de 2001

Percebe-se que o regime de ventos apresenta uma variação típica ao longo do ano, independente do mês que se analise, com períodos de velocidade abaixo da média mensal nas primeiras horas do dia (até as oito horas da manhã). Nota-se ainda, em geral, que as maiores velocidades são encontradas entre as doze e dezesseis horas.

Os dados de velocidade média trabalhados a partir dos dados do Cepagri para o ano de 2001 foram comparados com os dados para o ano de 2000 do IAC. Quatro curvas de velocidade média foram elaboradas para a comparação. A primeira, os dados do Cepagri com medições a cinco metros de altura; a segunda, os dados do IAC (medições a dez metros de altura); a terceira e a quarta, com os dados do Cepagri com medições a dez metros de altura, para dois valores de α .

Para determinar a terceira e a quarta curvas, calculou-se as velocidades médias do Cepagri a dez metros de altura, de acordo com a Lei da Potência (seção 4.1.4, Eq.4.15), para dois valores de α (0,16 e 0,20 – Tab. 4.3).

$$\alpha = 0,16 \Rightarrow v(z) = v(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \rightarrow v(10) = v(5) \cdot \left(\frac{10}{5} \right)^{0,16} \rightarrow v(10) = 1,117 v(5) \quad (6.1)$$

$$\alpha = 0,20 \Rightarrow v(z) = v(z_r) \cdot \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \rightarrow v(10) = v(5) \cdot \left(\frac{10}{5} \right)^{0,20} \rightarrow v(10) = 1,149 v(5) \quad (6.2)$$

Tabela 6.1 – Fator multiplicativo para diferentes valores de α

Valor de α	Fator multiplicativo da velocidade média
0,16	1,117
0,20	1,149

Analisando a Tab. 6.1, pode-se perceber que a escolha do fator α influencia no cálculo da velocidade dos ventos a diferentes alturas. Para uma valor 0,16, a velocidade aumenta 11,7 %, para 0,20, 14,9 %.

Assim, as velocidades médias relativas aos dados do Cepagri foram multiplicadas pelos fatores da Tab. 6.1 para que fossem encontradas a terceira e quarta curvas.

A comparação pode ser vista na Fig. 6.13. Pode-se notar a influência do local da instalação da estação de coleta de dados, já que têm-se variações na velocidade de vento medida, entre os dados do Cepagri e do IAC⁴⁹.

⁴⁹ As variações também são devidas às diferentes estações de coletas de dados bem como a aproximação dos dados do Cepagri utilizando a Lei da Potência.

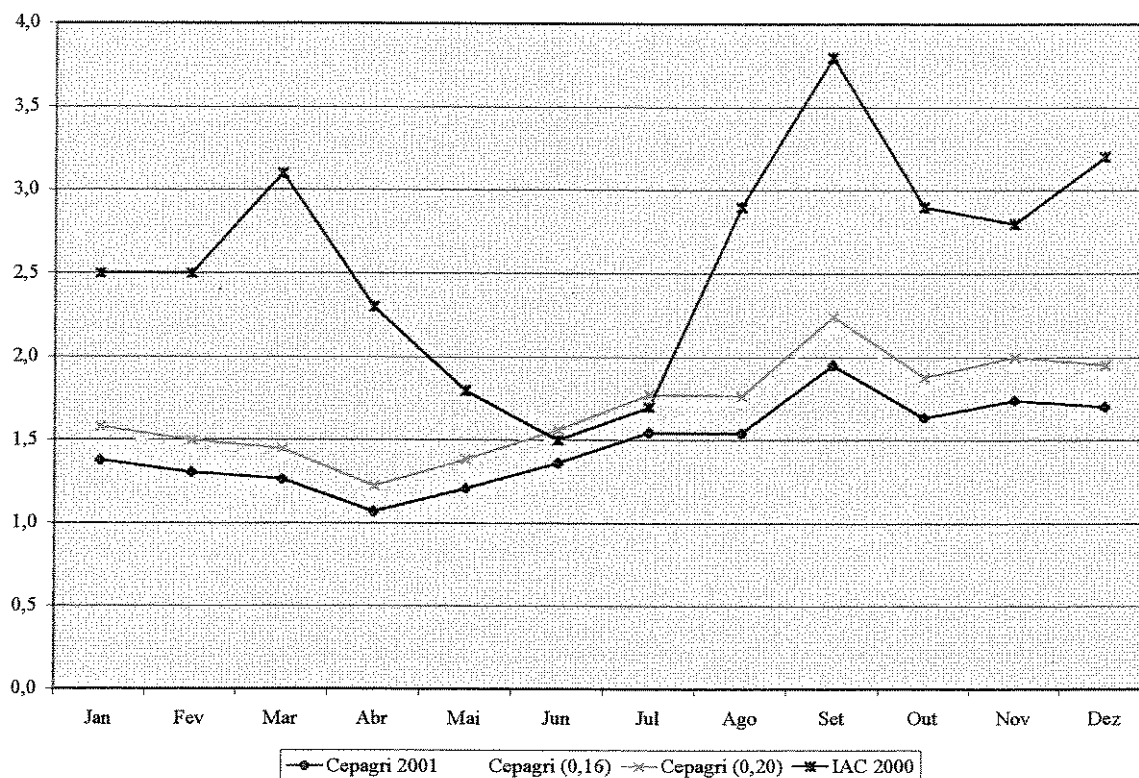


Figura 6.2 – Comparação da velocidade média dos ventos.

6.2. As variáveis da distribuição de Weibull

Para que a comparação entre os valores da distribuição de Weibull fosse possível, ajustou-se a altura de medição para os dados do Cepagri (para α igual a 0,16 e 0,20), como elaborado na seção anterior, já que na análise desta distribuição é comum que os dados estejam na altura internacional padrão de medição, que é de 10 metros. Com os dados disponibilizados pelo Cepagri (1997 a 2001) e pelo IAC, calculou-se, para cada bloco, os valores de k e c da distribuição de Weibull, a partir da velocidade média e do desvio padrão, sendo que estes parâmetros foram colocados no software do RERL. Os resultados podem ser vistos na Tab. 6.2.

Tabela 6.2 – Parâmetros da distribuição de Weibull

	Cepagri (1997-2001)	Cepagri ($\alpha=0,16$) (1997-2001)	Cepagri ($\alpha=0,20$) (1997-2001)	IAC (1956-2000)
Parâmetros				
Velocidade média (\bar{V})	1,631	1,822	1,874	2,218
Desvio padrão (σ)	1,028	1,148	1,181	0,843
Distribuição de Weibull				
k (fator de forma)	1,651	1,651	1,651	2,859
c (fator de escala)	1,824	2,038	2,096	2,489

Fonte: Elaboração própria

Como visto na seção 4.2, é interessante para o cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull que seja considerada a maior quantidade de dados disponíveis (vários anos de medição). Desta forma, sendo que as médias históricas do IAC apresentam dados desde 1956, considera-se que os valores de k e c calculados a partir destes dados são os que melhores se aproximam da característica dos ventos do local de instalação.

6.3.A eficiência do sistema

Os gráficos apresentados a seguir (Fig. 6.14 a 6.22) mostram a energia diária contida nos ventos (dados do Cepagri para o ano de 2001) e a gerada pelo sistema (dados medidos com o *data logger*) para os meses estudados neste trabalho.

Figura 6.3 - Energia contida nos ventos e energia produzida pelo aerogerador

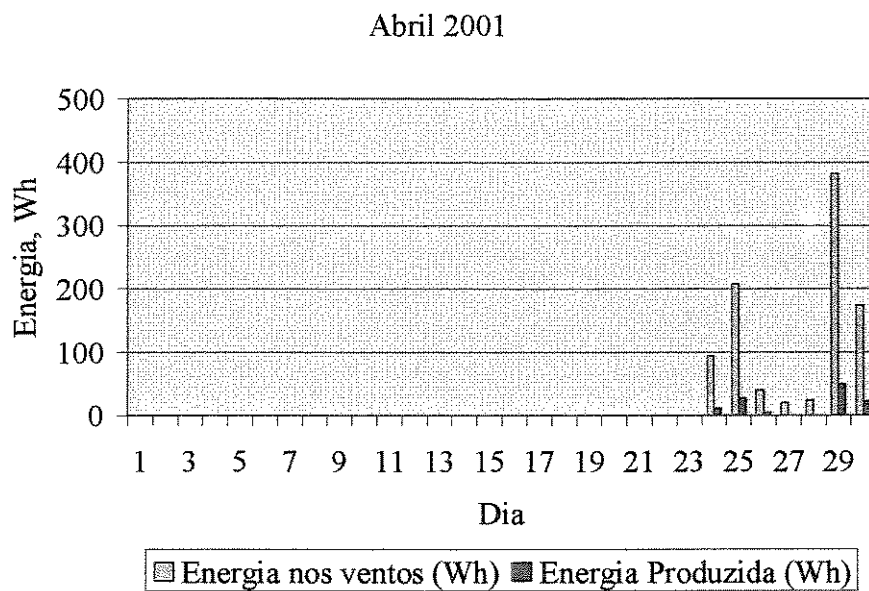


Figura 6.3-a – Abril de 2001

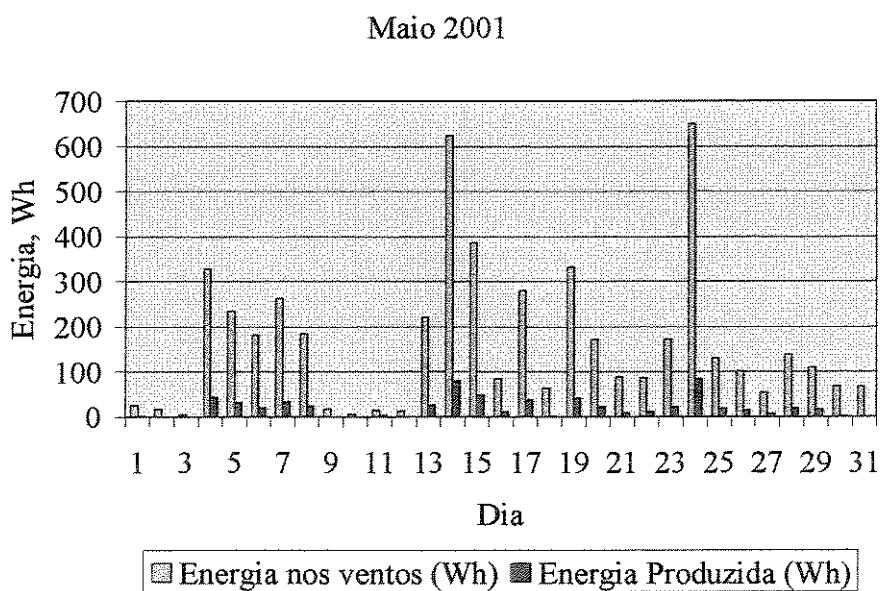


Figura 6.3-b – Maio de 2001

Junho 2001

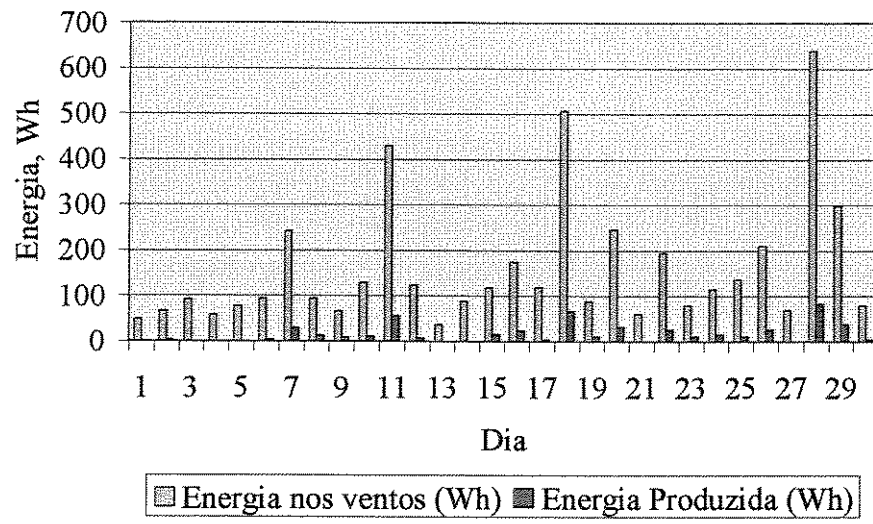


Figura 6.3-c – Junho de 2001

Julho 2001

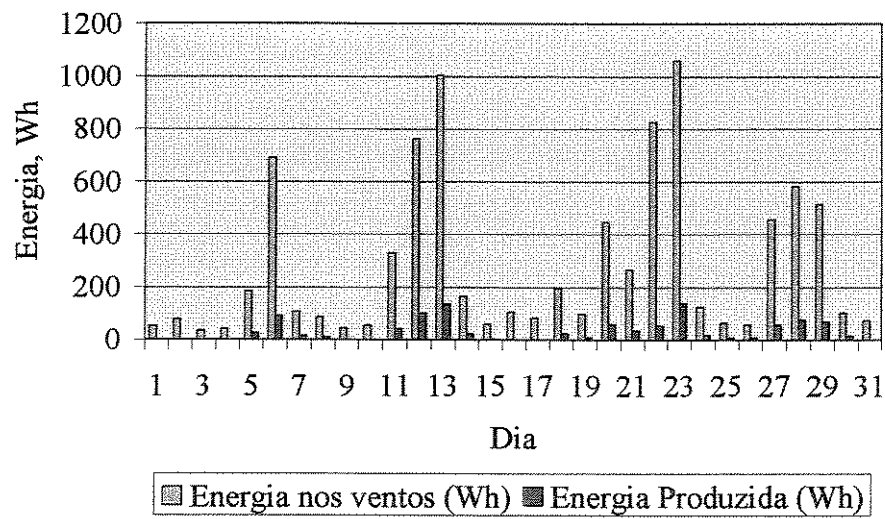


Figura 6.3-d – Julho de 2001

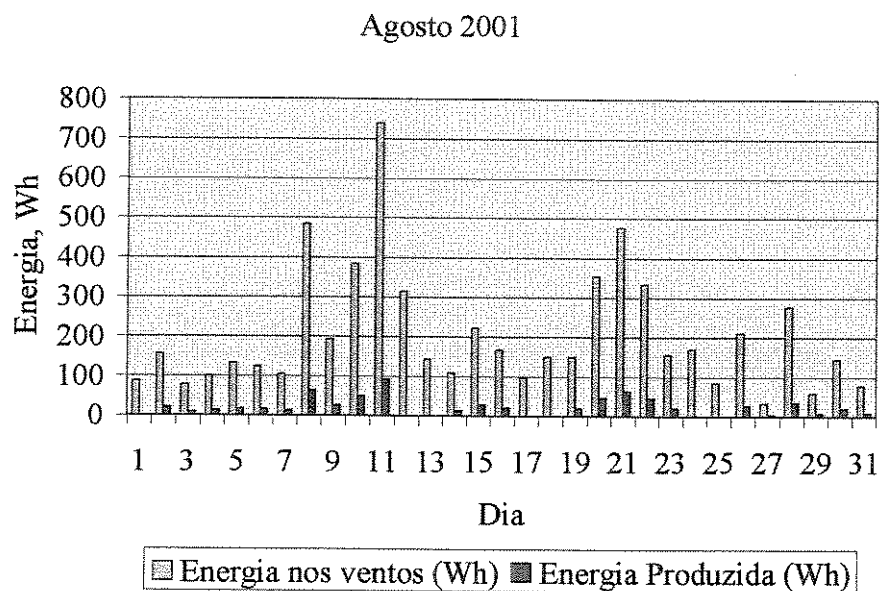


Figura 6.3-e – Agosto de 2001

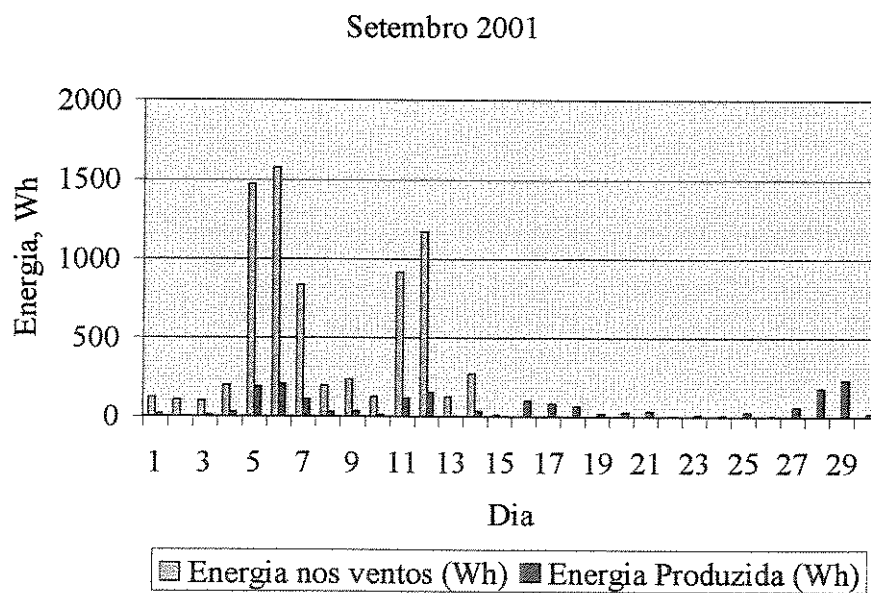


Figura 6.3-f – Setembro de 2001⁵⁰

⁵⁰ A estação de coleta de dados do Cepagri não funcionou do dia 15/09/01 a 08/10/01 e por este motivo não é possível determinar a energia contida nos ventos neste período (Figuras 6.3-f e 6.3-g).

Outubro 2001

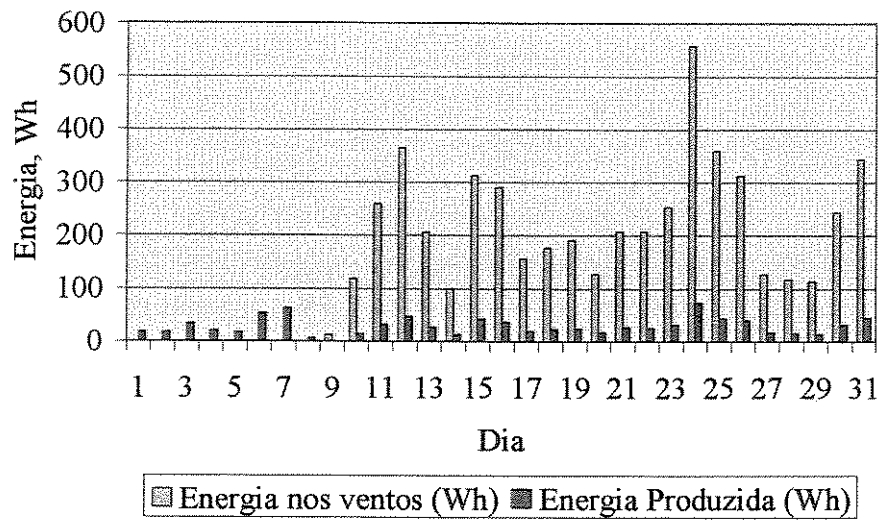


Figura 6.3-g – Outubro de 2001

Novembro 2001

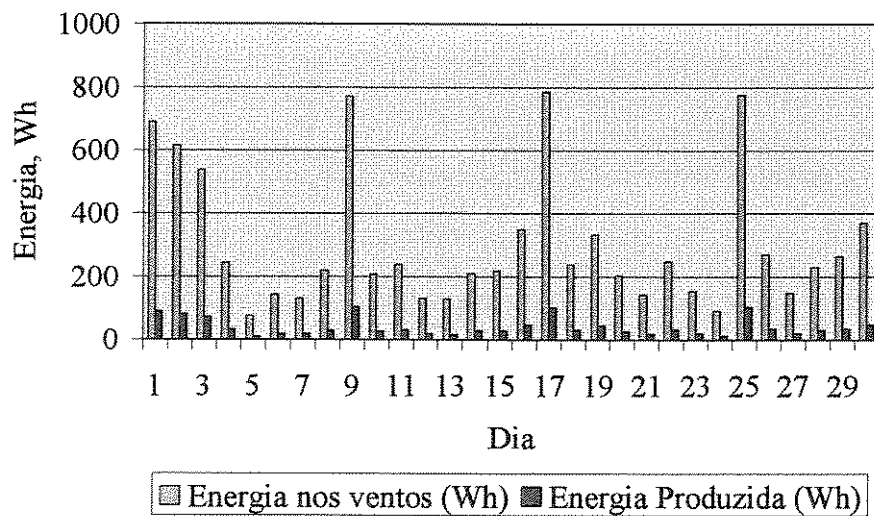


Figura 6.3-h – Novembro de 2001

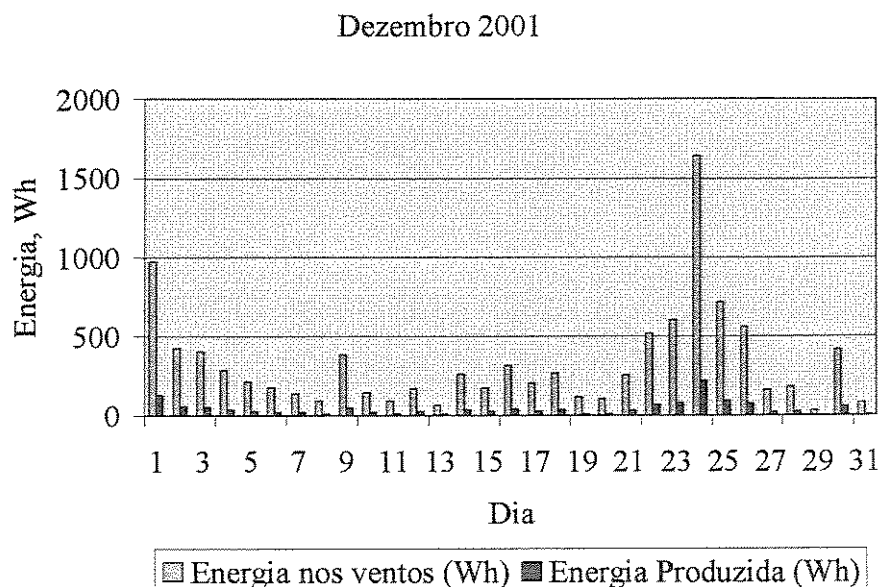


Figura 6.3-i – Dezembro de 2001

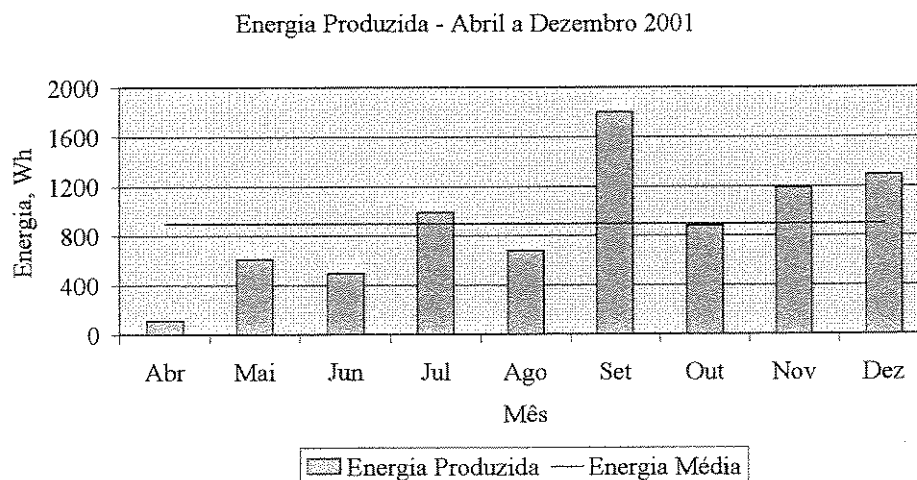


Figura 6.4 – Energia mensal produzida pelo aerogerador (Abril a Dezembro/2001)

Analisando os gráficos (Fig. 6.3-a a 6.3-i) percebe-se a baixa eficiência do sistema. O aerogerador de 500 W produziu, nestes nove meses de pesquisa, um total de 8044,8 Wh (Fig. 6.4 e Tab. 6.3), tendo média mensal de 893,9 Wh.

Tabela 6.3 – Valores obtidos para o sistema eólico (Abril/2001 a Dezembro/2001)

Mês	Energia produzida pelo aerogerador (Wh)
Abril/2001	114,8
Mai/2001	609,7
Junho/2001	496,1
Julho/2001	988,0
Agosto/2001	678,9
Setembro/2001	1797,8
Outubro/20001	880,6
Novembro/2001	1187,0
Dezembro/2001	1291,8
Média	893,9 ± 495,3
Total	8044,8

Fonte: Elaboração própria

O sistema eólico entrou em funcionamento no dia 24/04/01, por isso o mesmo gerou pouca eletricidade neste mês, sendo calculada a eficiência do sistema apenas para os dias posteriores a este. Entre 15/09/01 e 08/10/01 a estação de coleta de dados do Cepagri não funcionou. Desta forma, a energia contida nos ventos para o mês de Setembro e Outubro não reflete exatamente este parâmetro pois, nos dias referidos, os dados de velocidade instantânea dos ventos para o cálculo da energia não estavam disponíveis.

Sendo assim, para o cálculo da eficiência do sistema, elaborou-se uma outra tabela (Tab. 6.4) que contabiliza apenas os dias em que a estação e o sistema eólico efetivamente funcionaram.

Tabela 6.4 – Eficiência do sistema eólico (Abril/2001 a Dezembro/2001)

Mês	Energia contida nos ventos (Wh)	Energia produzida pelo aerogerador (Wh)	Eficiência média (%)
Abril/2001	940,99	114,8	12,2
Maio/2001	5100,9	609,7	12,0
Junho/2001	4767,7	496,1	10,4
Julho/2001	8700,6	988,0	11,4
Agosto/2001	6297,5	678,9	10,8
Setembro/2001	7441,4	934,9	12,6
Outubro/20001	5138,8	653,5	12,7
Novembro/2001	9118,5	1187,0	13,0
Dezembro/2001	10173,7	1291,8	12,7
Média	6408,9	772,8	12,0 ± 0,9

Fonte: Elaboração própria

Analisando a Tab.6.4, a eficiência média do sistema, calculada de acordo com a Eq. 5.3, ficou em 12%. Este valor desconsidera as diferenças que são ocasionadas devido à localização da estação meteorológica do Cepagri (distante aproximadamente 1.000 metros do local da instalação do projeto), bem como ao ajuste das alturas (a estação do Cepagri fornece dados a 5 metros de altura e o aerogerador está posicionado a 6 metros do nível do solo). Com esta última aproximação, encontra-se uma diferença de 3% maior para as velocidades ajustadas (eficiência do sistema 0,35 pontos percentuais menor) para um valor de α igual a 0,16.

Comparando este valor com os encontrados na literatura, observa-se que este é inferior. Para todos os meses analisados, de acordo com os dados do Cepagri, a velocidade média mensal dos ventos é abaixo da velocidade de *start-up* do aerogerador, fazendo com que este fique estacionário em alguns períodos do dia sem produzir eletricidade.

De uma forma geral, o sistema se comportou de forma satisfatória ao longo dos meses de análise, sem que fosse necessária a intervenção para manutenção nos equipamentos.

Capítulo 7

Conclusões

A energia eólica é uma das fontes renováveis que apresenta maiores vantagens na geração de energia elétrica. Em todo o mundo, o uso dessa energia na geração complementar de eletricidade tem sido constantemente difundido e se espera um crescimento ainda mais significativo para os próximos anos, conforme visto no Capítulo 2.

O uso da energia eólica possui alguns atrativos para geração de energia elétrica, onde destacam-se: a) contribuição para aumento da diversidade de suprimento no parque gerador; b) o rápido desenvolvimento e a inovação tecnológica presente em diferentes condições de projeto, contribuindo para a diminuição de custos; c) a possibilidade de curtos prazos entre projetos preliminares e instalação (estima-se que, observadas as características do local de instalação, é possível o comissionamento em apenas um ano – para projetos comerciais com 600 ou 750 kW de potência).

No entanto, mesmo considerando que o “combustível” utilizado é gratuito e abundante em muitas localidades, a energia eólica ainda é uma tecnologia freqüentemente omitida nas decisões de fornecimento de energia elétrica devido a barreiras ainda existentes e que foram apresentadas no Capítulo 2. Alguns autores (Milligan, 1998) inclusive, a consideram uma fonte de energia que não é confiável – intermitente – e pode desestabilizar o sistema elétrico na qual está conectada).

A energia eólica tem um futuro ainda mais promissor com a conscientização pública das suas vantagens como fonte renovável de energia e a progressiva competitividade econômica. As

questões ambientais estão cada vez mais difundidas e atitudes em favor ao meio ambiente estão se tornando parte integrante dos processos decisórios sob vários aspectos e novas formas de incentivo para compra de energia renovável estão sendo introduzidos, inclusive no Brasil, como pode ser visto no apêndice 2.

Na questão energética não poderia ser diferente. Grande parte dos problemas ecológicos de efeito global tais como chuva ácida, efeito estufa, entre outros, são provenientes do setor energético. A utilização de soluções energéticas que agredem em menor escala o meio ambiente tem mostrado a energia eólica como uma fonte alternativa de grande importância na elaboração de novos cenários energéticos ecologicamente melhores.

Existem vários projetos significativos já em operação que comprovam a eficiência da tecnologia frente às condições brasileiras, mesmo estando a energia eólica em fase inicial de grandes investimentos, como visto no capítulo 2.

Porém, para o sistema que foi objeto de estudo deste trabalho, a eficiência energética, em geral, ficou em 12%, na comparação entre a energia contida nos ventos e a realmente fornecida pelo aerogerador, de acordo com as medições realizadas. É relevante ressaltar que o projeto montado para esta análise não se preocupou em realizar um estudo prévio para otimização de sua localização. Ele teve como objetivo principal realizar as primeiras análises de regime de ventos, medições e familiarização com a tecnologia de geração eólica no grupo de pesquisa GE4R (Grupo de Estudos em Eficiência Energética e Energias Renováveis).

Este valor de eficiência está bem abaixo, como poderia ser esperado, daqueles encontrados nas plantas eólicas comerciais, que giram em torno de 35% para sistemas de grande porte. A eficiência do sistema montado na UNICAMP varia em torno de 25% entre os meses do ano (pode-se observar na Tab. 6.4), apresentando valores de 10,4% em Julho e 13% em Novembro. Observa-se que a eficiência do sistema é diretamente proporcional à velocidade média do vento, sendo que nos meses de médias mais elevadas, tem-se eficiência maior.

Analogamente, a quantidade de eletricidade produzida é maior nos períodos em que aumentam as médias de velocidade dos ventos, observado entre os meses de Setembro e

Novembro. Deve-se lembrar que a energia disponível nos ventos variam com o cubo da velocidade dos mesmos.

Os valores de “k” e “c” da distribuição de Weibull, para o período compreendido entre 1997 e 2001, mostram que a região não possui condições de utilização da energia eólica. As médias históricas do IAC também permitem esta conclusão (velocidades médias anuais de 2 m/s).

Mesmo encontrando valores que não beneficiam a energia eólica, a busca de novas fontes de geração de energia elétrica não pode descaracterizar a vocação renovável do sistema elétrico nacional. O reconhecimento dos potenciais renováveis e sua utilização é um dos grandes fatores para a manutenção da geração de energia limpa (característica do sistema hidrelétrico nacional).

O desenvolvimento da energia eólica no Brasil deve ser acompanhada não só de ações políticas mas também de várias frentes de pesquisas e desenvolvimento. Várias instituições no Brasil já promovem pesquisas nos mais diversos segmentos da utilização da energia eólica com resultados já aplicados para utilização de sistemas eólicos na geração de energia. O estudo de aplicabilidade de projetos no Brasil necessita de dados e ajustes inerentes às características climáticas e de relevo de cada região. O Brasil, por apresentar características próprias, necessita de estudos de validação e ajustes dos modelos internacionais já consagrados. Para viabilizar uma participação mais efetiva da energia eólica na matriz energética nacional, destacam-se as seguintes linhas de pesquisa e desenvolvimento:

- Modelos computacionais adequados ao clima e à topografia do Brasil;
- Distribuição estatística de dados de vento e uniformidade na disponibilização dos dados;
- Pesquisa sobre a qualidade da energia de fazendas eólicas e o impacto na rede;
- Desenvolvimento aerodinâmico de aerogeradores adequados a condições tropicais do Brasil;
- Pesquisas sobre a aplicabilidade da energia eólica em sistemas híbridos (Eólico- Diesel e Eólico-Solar-Diesel).

7.1.Recomendações e alternativas de melhoria

Tendo em vista que os estudos sobre a energia eólica evoluirão, algumas alternativas de melhoria para o sistema implantado, bem como para expansão do mesmo, são descritas a seguir.

De uma forma geral, nos sistemas que empregam medições de variáveis, principalmente as climáticas, melhora-se as condições de análise das características de funcionamento, à medida que o sistema permaneça operando.

Para o sistema já instalado na UNICAMP, o desempenho da eficiência de conversão poderia ser melhor avaliado instalando-se na torre, junto ao aerogerador, um anemômetro, para se medir, com precisão, a real velocidade do vento que passa pelo aerogerador⁵¹. Pode-se ainda, colocar uma estação meteorológica com sensores de direção e velocidade dos ventos, próxima ao sistema montado, para auxiliar na avaliação do sistema⁵².

Para a expansão do sistema, seria interessante posicionar o aerogerador, através de uma nova torre, a uma maior altura, observando que em maiores alturas a velocidade dos ventos tende a ser maior, melhorando a quantidade de energia elétrica produzida. Uma outra forma de melhorar o sistema seria a substituição do rotor (hoje com duas pás) por um outro, de três ou até mesmo quatro pás. Esta substituição reduziria o torque de partida do aerogerador, fazendo com que seja diminuída a velocidade mínima de vento para o *start up* do aerogerador, que é de 2 m/s.

⁵¹ Os dados utilizados neste trabalho foram coletados pelo Cepagri e a estação está distante aproximadamente 1.000 metros do aerogerador.

⁵² Esta estação meteorológica foi adquirida e está em funcionamento desde meados de Dezembro/01.

Referências Bibliográficas

- Ackermann T., Andersson, G., Söder, L. "What is Distributed Generation?" Royal Institute of Technology: Department of Electric Power Engineering, 1999. Disponível na internet via <http://www.ekc.kth.se> (consultado em 2000).
- AKF - Amternes og Kommunernes Forskningsinstitut. "Social Assesment of Wind Power". Denmark, Research institute of the contries and municipalities in Denmark. April, 1996.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. "O Estado Das Energias Renováveis no Brasil" Brasília: 1998. CD-ROM: Série Estudos e Informações Hidrológicas e Energéticas n7.
- _____. "ANEEL Atualiza Valor Normativo" Brasília, Fev., 2001a. Disponível na internet via <http://www.aneel.gov.br> (consultado em 2001a).
- _____. "Novas Usinas Eólicas no Brasil". Dez., 2001b. Disponível na internet via <http://www.aneel.gov.br> (consultado em 2001b).
- Bourillon, C. "Wind Energy - Clean Power for Generations" *Renewable Energy* 16, 1-4 , Jan, 1999: 948-953.
- BTM Consult ApS. "World Market Update 1999". German, March 2000. Disponível na internet via <http://www.btm.dk> (consultado em 2000).
- Camargo, J. C. "Medidas do Potencial Fotovoltaico na Região Das Bacias Dos Rios Piracicaba e Capivari" Mestrado diss., Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 108p. 2000.

- Canalenergia. "Wobben Windpower inaugura fábrica de equipamentos eólicos no Ceará". 2002.
Disponível na internet via
<http://www.canalenergia.com.br/cenergia/calandra.nsf/0/0DD7A0B8992E8BDB83256B4200627D7E?OpenDocument> (consultado em 2002)
- CHESF-BRASCEP. "De Cata-Ventos a Aerogeradores: o Uso do Vento" Fontes Energéticas Brasileiras, Inventário/Tecnologia: Energia Eólica, Rio de Janeiro, 1997.
- CHESF- COELCE. "Potencial Eólico no Litoral do Ceará e Rio Grande do Norte Para Geração de Energia Elétrica" (Recife) (Out., 1996).
- Coimbra, C. M. "Perspectiva de Inserção da Energia Eólica na Matriz Energética Nacional: um Projeto Para a Eletrificação de Uma Vila Isolada - Análise Comparativa: Sistema Eólico x Sistema Diesel" Mestrado diss., Rio de Janeiro: COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 164p. 1999.
- CRESESB - Centro de Referência para as energias solar e eólica Sérgio de Salvo Brito. "Cresesb Informe". Rio de Janeiro, Dez., 1996. Vol.2, n.2.
- _____ "Creseb Informe - Encontro na Argentina Otimiza o Uso de Energia Eólica". Rio de Janeiro, Maio, 1999. Vol.4, n.5.
- DEWI - Deutsches Windenergie Institut. "Environmental Aspects and Acceptance of Wind Energy". Wilhelmshavenm, Eldorado Summer School. 1996.
- _____ "Wind Energy Use in Germany" English. <http://www.dewi.de/statistics.html> (consultado em 2000).
- Dutra, R. M. "Viabilidade Técnico-Econômica da Energia Eólica Face ao Novo Marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro". Mestrado diss., Rio de Janeiro: COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 309p. 2001.
- DWTMA - Danish Wind Turbine Manufacture's Association. "Medvind 1995 - Windenergy 1995". Denmark, 1995.

- ELETRONBRÁS. "Fontes de Energia - Energias Alternativas". Disponível na internet via <http://www.eletronbras.gov.br> (consultado em 2000).
- Elliot, D. "Renewable Energy and Sustainable Futures" *Futures*. Vol 32, pp261-274. Great Britain, 2000.
- Elliot, D. L., Holladay, C. G., Barchett, W. R. Foote, H. P., Sandusky, H. F. "Characteristics of the Wind" US department of energy. Washington, D.C., 1986. DOE/CH100934.
- Eólica. "Principais Projetos de Energia Eólica no Brasil" Disponível na internet via <http://www.eolica.com.br> (consultado em 2000).
- EPRI - Electric Power Research Institute. "Distributed Generation". Disponível na internet via <http://www.epri.com/gg/newgen/disgen/index.html>: January, 1998 (consultado em 2000).
- Esslemont, E., Moccormick, M. *Sociological Impact of a Wind Farm Development*. The World Directory of Renewable Energy: Suppliers and Services. London: JamesxJames, 1996.
- EWEA - European Wind Energy Association. "Economics of Wind Generated Energy". EWEA Special Topic Conference. Finland, September, 1998.
- _____ "Wind Energy - The Facts" *Technology*, Vol. 1., 2000a. Disponível na internet via <http://www.ewea.org> (consultado em 2000).
- _____ "Wind Energy - The Facts" *Market Development*, Vol. 5., 2000b. Disponível na internet via <http://www.ewea.org> (consultado em 2000).
- _____ "Wind Energy - The Facts" *Cost, Prices and Values*, Vol. 2., 2000c. Disponível na internet via <http://www.ewea.org> (consultado em 2000).
- _____ "Wind Energy - The Facts" *Environment*, Vol. 4., 2000d. Disponível na internet via <http://www.ewea.org> (consultado em 2000).
- _____ "Wind Energy and the Environment" 2000e. Disponível na internet <http://www.ewea.org/src/environment.htm> (consultado em 2000).

- Flowers, L., I. Baring-Gould, and J. Bianchi. "Renewable for Sustainable Village Power" *American Wind Energy Association's WindPower 2000 Conference* (Palm Springs, California) (November, 2000.).
- Gipe, P. *Wind Power for Home & Business: Renewable Energy for the 1990s and Beyond*. 2nd Edition. Vermont: Chelsea Green, 1993.
- _____. *Wind Energy - Comes of Age*. New York: John Wiley & Sons, 1995.
- _____. "Overview of Worldwide Wind Generation". 1999. Adapted from *Wind Energy - Comes Age* (John Wiley & Sons, 1995).
- _____. "The Great Wind Rush of 99" *New Energy*, 129. February, 2000.
- Greenpeace International, European Wind Energy Association (EWEA) and Forum For Energy And Development - Fed. "Wind Force 10 - A Blueprint To Achieve 10% Of The World's Electricity From Wind Power By 2020". London, 1999.
- Hirata, M. H. *Energia Eólica - Uma Introdução*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1985.
- _____. *O Aproveitamento da Energia Eólica no Meio Rural*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1990.
- Holt, J. S., Milborrow, D. J., Surman, P. L.. "Standard Procedures for Meteorological Measurements at a Potential Wind Turbine Site" *Proceedings of BWEA Conference*, Glasgow, 1989.
- Hulscher, W., Frankel, P. *The Power Guide*. 2nd edition. University of Twente, 1994.
- Jacobson, M. Z., Masters, G. M. "Exploiting Wind Versus Coal" *Science* 293. August, 2001.
- Johansson, T., Kelly, H., Reddy A. K., Williams, R. H. Chap. in *Renewable Energy*. Chapter 2 and 3. 73-156. London: Earthscan, 1993.
- Johnson, G. L. *Wind Energy Systems*. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
- Lysen, E. H. *Introduction to Wind Energy*. 2nd edition. Netherlands: CWD, 1983.

- McGowan, J. G., Connors, S. R. "Windpower: A Turn of the Century Review" *Annual Review of Energy and the Environment*. Vol 25, pp147-197, 2000.
- Milligan, M. R., Artig, R. "Optimal Site Selection and Sizing of Distributed Utility-Scale Wind Power Plants" *International Association of Energy Economists International Conference*, Quebec, Canada, April, 1998.
- Mortensen, N. G. "Wind Atlas Analysis and Application Program (WasP)". Roskilde., Risø National Laboratory. 1993.
- Nfaoui, H., Buret, J. Sayigh, A. M. "Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Morocco" *Solar Energy*. Vol 63, Issue 1, pp51-60. Great Britain, February, 1998.
- NREL - National Renewable Energy Laboratory. "Wind Energy Engineering Toolbox of Mini-Codes, Versão 1.01" - English. Disponível na internet via <http://www.ecs.umass.edu/mie/labs/rerl/Software/MiniCodeOverview.html> (consultado em 2000).
- _____. "Arquivos de Fotos" Maio, 2001. Disponível na internet via <http://www.nrel.gov/> (consultado em 2001).
- Park, J. *The Wind Power Book*. 253p. Palo Alto: Chesire, 1981.
- Pereira, O. L. S. "As Energias Solar e Eólica" *Seminário de Desenvolvimento Energético Sustentável*, UFRJ, ELETROBRAS, MME. Rio de Janeiro, 1998. 171-181.
- Poje, D., Cividini, B. "Assessment of Wind Energy Potential in Croacia" *Solar Energy*. Vol 56, Issue 3, pp561-575. Great Britain, 1998.
- Rohatgi, J. S., Nelson, V. *Wind Characteristics - An Analysis for the Generation of Wind Power*. Canyon: West Texas A&M University, 1994.
- Silva, P. C. "Sistema Para Tratamento, Armazenamento e Disseminação de Dados de Vento" Mestrado diss., Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ. 1999.

WEA - World Energy Assessment "Energy Resources and Technology Options" *Part II, Chapter 5*, 2000a. 38p.

_____. "Renewable Energy Technologies" *Part II, Chapter 7*, 2000b. 54p.

WEG. Manuais e catálogos de Geradores elétricos. "Geradores Linha S, Geradores Tipo DBL Geradores Síncronos - Linha G". 2001. Disponível na internet via <http://www.weg.com.br> (consultado em 2001).

WINROCK International. "Trade Guide on Renewable Energy in Brazil". USAid. Salvador, April, 1999. 100p.

World Energy Council. "New Renewable Energy Resources: Opportunities and Constraints 1990-2020". London, Kogan Page. 1993.

Anexo 1

Tabela de valores diários das principais medições

Legenda

C1: Dia

C2: Energia fornecida pelo aerogerador (Wh)

C3: Energia contida nos ventos (Wh)

C4: Eficiência do sistema ($C2/C3 \cdot 100$)

ND: Dados não disponíveis

Abril 2001

C1	C2	C3	C4
24/4/2001	11,21	93,84	11,95
25/4/2001	27,01	207,63	13,01
26/4/2001	4,90	39,15	12,52
27/4/2001	0,00	20,24	0,00
28/4/2001	0,00	24,17	0,00
29/4/2001	49,24	381,48	12,91
30/4/2001	22,39	174,47	12,83
Total	114,76	940,99	12,2
Média	16,39	134,43	

Maio 2001

C1	C2	C3	C4
1/5/2001	1,39	25,42	5,48
2/5/2001	0,00	16,18	0,00
3/5/2001	0,00	3,80	0,00
4/5/2001	41,77	327,29	12,76
5/5/2001	30,97	233,77	13,25
6/5/2001	18,92	181,86	10,40
7/5/2001	32,55	261,64	12,44
8/5/2001	24,00	184,57	13,00
9/5/2001	0,00	16,18	0,00
10/5/2001	0,00	5,36	0,00
11/5/2001	1,83	14,38	12,72
12/5/2001	0,00	12,93	0,00
13/5/2001	25,64	220,07	11,65
14/5/2001	79,16	623,54	12,70
15/5/2001	48,49	385,18	12,59
16/5/2001	10,88	83,04	13,11
17/5/2001	35,97	279,59	12,86
18/5/2001	0,35	63,32	0,55
19/5/2001	41,04	331,41	12,38
20/5/2001	22,03	171,29	12,86
21/5/2001	7,56	87,21	8,67
22/5/2001	11,35	86,10	13,19
23/5/2001	21,44	171,28	12,52
24/5/2001	83,35	649,47	12,83
25/5/2001	17,62	130,05	13,55
26/5/2001	13,13	100,67	13,04
27/5/2001	7,09	54,22	13,07
28/5/2001	17,65	137,07	12,88
29/5/2001	14,80	108,69	13,61
30/5/2001	0,75	68,42	1,10
31/5/2001	0,00	66,84	0,00

Total 609,73 5100,85
Média 19,67 164,54 11,95

Junho 2001

C1	C2	C3	C4
1/6/2001	0,00	47,81	0,00
2/6/2001	2,53	66,21	3,83
3/6/2001	0,00	91,64	0,00
4/6/2001	0,00	57,39	0,00
5/6/2001	0,00	78,02	0,00
6/6/2001	4,04	93,23	4,33
7/6/2001	29,92	242,61	12,33
8/6/2001	11,88	92,80	12,80
9/6/2001	8,35	66,24	12,61
10/6/2001	11,55	128,04	9,02
11/6/2001	55,98	429,64	13,03
12/6/2001	6,27	122,39	5,12
13/6/2001	0,00	36,46	0,00
14/6/2001	0,00	87,24	0,00
15/6/2001	15,38	117,77	13,06
16/6/2001	23,08	173,93	13,27
17/6/2001	4,61	118,33	3,89
18/6/2001	65,68	505,60	12,99
19/6/2001	11,18	87,68	12,75
20/6/2001	31,81	245,67	12,95
21/6/2001	0,00	61,02	0,00
22/6/2001	25,13	194,66	12,91
23/6/2001	10,36	79,54	13,03
24/6/2001	15,09	114,10	13,22
25/6/2001	11,52	135,86	8,48
26/6/2001	26,24	208,81	12,56
27/6/2001	0,00	69,26	0,00
28/6/2001	83,12	639,16	13,00
29/6/2001	38,37	296,87	12,92
30/6/2001	4,02	79,71	5,05

Total 496,11 4767,69
Média 16,54 158,92 10,41

Julho 2001**Agosto 2001**

C1	C2	C3	C4
1/7/2001	0,00	50,86	0,01
2/7/2001	0,04	77,90	0,05
3/7/2001	0,07	33,73	0,20
4/7/2001	0,01	40,38	0,02
5/7/2001	24,64	181,18	13,60
6/7/2001	89,57	689,90	12,98
7/7/2001	13,47	103,56	13,01
8/7/2001	9,29	85,17	10,90
9/7/2001	0,00	43,69	0,00
10/7/2001	0,00	53,70	0,00
11/7/2001	42,00	327,03	12,84
12/7/2001	98,42	759,19	12,96
13/7/2001	132,94	1004,45	13,23
14/7/2001	20,86	161,73	12,90
15/7/2001	2,49	57,39	4,35
16/7/2001	0,00	103,78	0,00
17/7/2001	0,00	81,61	0,00
18/7/2001	24,62	193,79	12,71
19/7/2001	5,78	96,21	6,01
20/7/2001	57,40	443,81	12,93
21/7/2001	34,39	264,26	13,02
22/7/2001	52,25	824,09	6,34
23/7/2001	137,72	1059,25	13,00
24/7/2001	16,20	124,30	13,03
25/7/2001	7,98	62,10	12,85
26/7/2001	7,69	58,65	13,11
27/7/2001	55,54	454,89	12,21
28/7/2001	74,21	580,81	12,78
29/7/2001	67,50	511,89	13,19
30/7/2001	12,94	100,25	12,91
31/7/2001	0,00	71,01	0,00
Total	988,02	8700,58	11,36
Média	31,87	280,66	

C1	C2	C3	C4
1/8/2001	0,00	86,98	0,00
2/8/2001	20,65	155,97	13,24
3/8/2001	9,92	77,64	12,77
4/8/2001	12,15	99,24	12,24
5/8/2001	17,41	132,95	13,09
6/8/2001	16,17	124,66	12,97
7/8/2001	12,99	105,19	12,35
8/8/2001	63,52	484,82	13,10
9/8/2001	24,67	191,66	12,87
10/8/2001	49,68	383,13	12,97
11/8/2001	91,14	738,92	12,33
12/8/2001	0,00	313,31	0,00
13/8/2001	0,00	141,79	0,00
14/8/2001	14,17	108,24	13,09
15/8/2001	28,90	221,33	13,06
16/8/2001	19,90	166,06	11,99
17/8/2001	0,00	97,40	0,00
18/8/2001	0,00	147,86	0,00
19/8/2001	19,31	148,48	13,00
20/8/2001	45,96	353,56	13,00
21/8/2001	63,05	475,76	13,25
22/8/2001	45,56	333,05	13,68
23/8/2001	20,27	155,76	13,01
24/8/2001	0,00	169,95	0,00
25/8/2001	0,00	83,85	0,00
26/8/2001	27,45	209,69	13,09
27/8/2001	4,40	33,72	13,06
28/8/2001	35,84	276,96	12,94
29/8/2001	7,52	57,77	13,02
30/8/2001	18,77	143,72	13,06
31/8/2001	9,52	78,05	12,20
Total	678,92	6297,48	10,78
Média	21,90	203,14	

Setembro 2001

C1	C2	C3	C4
1/9/2001	15,87	122,28	12,98
2/9/2001	0,35	102,25	0,34
3/9/2001	13,14	101,13	13,00
4/9/2001	25,77	196,22	13,13
5/9/2001	191,20	1470,26	13,00
6/9/2001	204,47	1575,81	12,98
7/9/2001	107,62	832,86	12,92
8/9/2001	25,42	194,01	13,10
9/9/2001	30,62	235,65	13,00
10/9/2001	12,81	125,47	10,21
11/9/2001	117,44	913,60	12,85
12/9/2001	151,99	1169,94	12,99
13/9/2001	3,57	122,62	2,91
14/9/2001	34,65	269,43	12,86
15/9/2001	0,00	9,84	0,00
16/9/2001	99,68	0,00	ND
17/9/2001	81,62	0,00	ND
18/9/2001	61,91	0,00	ND
19/9/2001	20,48	0,00	ND
20/9/2001	26,79	0,00	ND
21/9/2001	35,06	0,00	ND
22/9/2001	1,51	0,00	ND
23/9/2001	12,05	0,00	ND
24/9/2001	8,95	0,00	ND
25/9/2001	26,86	0,00	ND
26/9/2001	1,02	0,00	ND
27/9/2001	58,89	0,00	ND
28/9/2001	178,91	0,00	ND
29/9/2001	229,29	0,00	ND
30/9/2001	19,80	0,00	ND

Total 1797,75 7441,36
Média 59,92 248,05 12,56

Outubro 2001

C1	C2	C3	C4
1/10/2001	18,36	0,00	ND
2/10/2001	16,48	0,00	ND
3/10/2001	33,84	0,00	ND
4/10/2001	20,84	0,00	ND
5/10/2001	16,19	0,00	ND
6/10/2001	52,75	0,00	ND
7/10/2001	62,52	0,00	ND
8/10/2001	6,13	0,00	ND
9/10/2001	0,02	11,40	0,22
10/10/2001	13,76	117,27	11,73
11/10/2001	31,27	258,66	12,09
12/10/2001	46,86	364,90	12,84
13/10/2001	26,18	204,98	12,77
14/10/2001	12,72	98,24	12,95
15/10/2001	42,85	311,89	13,74
16/10/2001	36,41	290,09	12,55
17/10/2001	19,01	155,13	12,25
18/10/2001	22,72	176,27	12,89
19/10/2001	23,55	190,86	12,34
20/10/2001	16,68	126,40	13,20
21/10/2001	25,87	206,47	12,53
22/10/2001	25,27	206,10	12,26
23/10/2001	31,07	252,47	12,31
24/10/2001	72,54	556,40	13,04
25/10/2001	43,73	358,51	12,20
26/10/2001	40,03	312,79	12,80
27/10/2001	16,61	125,65	13,22
28/10/2001	14,85	116,12	12,78
29/10/2001	14,66	113,13	12,96
30/10/2001	31,73	243,16	13,05
31/10/2001	45,11	341,96	13,19

Total 880,63 5138,83
Média 28,41 165,77 12,72

Novembro 2001

Dezembro 2001

C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
1/11/2001	88,47	687,57	12,87	1/12/2001	126,57	972,20	13,02
2/11/2001	79,69	614,35	12,97	2/12/2001	55,40	425,82	13,01
3/11/2001	69,78	535,54	13,03	3/12/2001	52,19	405,23	12,88
4/11/2001	31,23	243,48	12,83	4/12/2001	37,38	286,46	13,05
5/11/2001	9,89	73,66	13,43	5/12/2001	27,99	214,56	13,04
6/11/2001	18,26	140,72	12,98	6/12/2001	17,81	177,86	10,01
7/11/2001	17,06	128,89	13,23	7/12/2001	18,17	137,16	13,24
8/11/2001	28,31	218,59	12,95	8/12/2001	8,63	90,79	9,50
9/11/2001	102,74	768,99	13,36	9/12/2001	49,43	383,93	12,87
10/11/2001	26,75	205,87	12,99	10/12/2001	19,68	145,17	13,56
11/11/2001	29,63	236,99	12,50	11/12/2001	12,28	94,14	13,04
12/11/2001	16,83	129,68	12,98	12/12/2001	21,72	167,87	12,94
13/11/2001	16,36	128,09	12,77	13/12/2001	8,41	65,36	12,86
14/11/2001	27,46	207,95	13,21	14/12/2001	34,19	263,59	12,97
15/11/2001	27,90	216,60	12,88	15/12/2001	22,43	173,47	12,93
16/11/2001	46,22	347,74	13,29	16/12/2001	40,92	314,05	13,03
17/11/2001	101,12	782,89	12,92	17/12/2001	27,05	206,20	13,12
18/11/2001	30,71	237,30	12,94	18/12/2001	35,24	268,22	13,14
19/11/2001	43,20	332,15	13,01	19/12/2001	6,24	116,73	5,35
20/11/2001	26,20	201,23	13,02	20/12/2001	5,63	104,94	5,37
21/11/2001	18,27	141,06	12,96	21/12/2001	33,34	254,65	13,09
22/11/2001	32,34	245,67	13,16	22/12/2001	66,33	517,59	12,82
23/11/2001	20,00	154,03	12,99	23/12/2001	79,87	602,76	13,25
24/11/2001	10,94	90,11	12,14	24/12/2001	218,09	1641,01	13,29
25/11/2001	102,00	774,28	13,17	25/12/2001	93,04	716,57	12,98
26/11/2001	34,92	268,32	13,02	26/12/2001	71,58	557,87	12,83
27/11/2001	19,18	147,96	12,96	27/12/2001	20,97	161,19	13,01
28/11/2001	29,56	227,50	12,99	28/12/2001	23,67	181,76	13,02
29/11/2001	34,76	263,69	13,18	29/12/2001	0,00	29,61	0,00
30/11/2001	47,23	367,62	12,85	30/12/2001	54,43	415,21	13,11
				31/12/2001	3,10	81,74	3,79
Total	1187,04	9118,53		Total	1291,77	10173,69	
Média	39,57	303,95	13,02	Média	41,67	328,18	12,70

Anexo 2 - Dados Mensais: Velocidade do vento (m/s)

Fonte: Instituto Agrônômico - Seção de climatologia agrícola

INSTITUTO AGRONOMICO - SECAO DE CLIMATOLOGIA AGRICOLA

ESTACAO EXPERIMENTAL DE CAMPINAS

LAT.: 22G 54S

LONG.:47G 05W

ALT.:694m

DADOS MENSAIS: VELOCIDADE DO VENTO (M/S)

PERIODO: 1956 - 2000

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
1956	2,9	2,8	2,9	3,1	2,5	2,4	2,5	3,3	3,1	4,1	4,6	3,2	3,1
1957	3,5	3,7	3,0	3,5	2,9	2,8	2,8	3,6	3,2	3,4	3,3	2,7	3,2
1958	2,7	2,4	2,4	3,1	3,0	2,8	3,4	3,2	3,4	3,3	2,7	2,5	2,9
1959	2,4	1,9	2,4	1,9	2,1	2,1	2,0	2,4	2,7	2,7	2,4	2,2	2,3
1960	2,1	1,6	1,6	1,7	1,9	1,6	1,7	1,8	1,9	1,8	1,4	1,4	1,7
1961	1,5	0,9	1,4	1,0	1,2	1,0	1,1	0,9	1,4	1,3	1,2	1,1	1,2
1962	1,6	1,3	0,6	1,5	1,6	1,4	1,6	1,6	2,3	2,2	2,1	2,1	1,7
1963	0,8	1,4	1,5	1,6	1,4	1,3	1,6	1,7	1,5	2,2	1,3	2,3	1,6
1964	1,5	1,1	1,8	1,3	1,0	0,9	1,2	2,2	2,2	2,1	2,4	1,7	1,6
1965	1,7	1,4	1,3	1,9	1,4	0,7	1,8	1,7	2,3	2,8	1,9	1,1	1,7
1966	0,9	1,4	1,9	2,5	2,6	2,3	2,3	2,9	3,1	3,1	2,9	2,4	2,4
1967	2,0	1,3	2,0	2,1	1,2	1,3	1,8	2,1	3,3	1,6	2,3	2,9	2,0
1968	1,4	2,2	1,6	1,8	1,0	1,6	1,5	1,8	2,2	2,4	2,6	1,4	1,8
1969	0,8	1,1	1,4	1,6	0,8	1,2	1,0	1,7	1,7	2,7	1,3	2,2	1,5
1970	1,0	0,5	0,7	0,7	0,3	0,8	1,2	1,1	1,6	1,7	3,6	2,4	1,3
1971	2,4	2,4	2,4	2,7	2,6	1,6	1,7	3,1	2,7	3,1	3,6	2,5	2,6
1972	1,2	0,9	1,1	1,7	1,0	0,8	1,3	1,4	2,3	2,2	1,4	1,5	1,4
1973	1,1	0,8	1,3	0,5	1,3	1,0	1,2	2,5	3,0	2,7	2,5	1,1	1,6
1974	0,9	0,5	0,7	1,5	0,7	1,2	0,8	1,7	2,4	1,3	2,6	2,1	1,4
1975	1,8	1,3	1,4	1,3	2,3	1,2	2,2	2,5	4,0	2,1	2,3	1,7	2,0
1976	1,3	2,5	1,7	2,0	1,9	1,6	2,4	2,1	2,0	2,9	1,5	1,9	2,0
1977	1,9	1,5	1,5	1,9	1,2	2,0	1,9	3,3	3,1	3,6	3,2	3,7	2,4
1978	2,7	2,6	2,0	3,0	2	1,5	2,0	2,6	3,4	2,4	2,8	2,2	2,4
1979	4,1	2,2	2,6	2,0	1,2	1,5	2,5	1,7	3,1	1,9	2,2	1,5	2,2
1980	1,7	1,6	1,0	2,0	0,8	1,3	2,7	2,2	3,2	3,5	3,3	1,2	2,0
1981	1,0	1,6	1,7	2,2	1,6	1,0	1,8	2,1	2,6	3,3	2,6	2,6	2,0
1982	2,9	1,3	2,3	3,7	2,3	1,4	1,9	1,8	3,7	3,0	2,7	2,8	2,5
1983	2,7	2,3	2,6	1,9	1,9	1,3	2,7	3,0	3,8	3,9	2,2	2,5	2,6
1984	1,9	2,4	2,8	2,9	1,3	1,9	3,0	3,2	2,2	3,3	2,4	1,7	2,4

Continuação

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
1985	2,4	1,6	1,3	2,0	1,8	1,7	2,8	2,6	3,3	3,0	2,5	2,1	2,3
1986	1,4	1,2	1,6	1,6	1,3	1,7	3,2	2,2	3,2	3,2	2,8	2,2	2,1
1987	1,7	2,5	2,8	2,5	2,1	1,9	2,3	3,2	2,8	2,9	2,4	1,9	2,4
1988	2,0	2,3	2,3	2,8	1,8	2,5	3,1	2,6	4,0	3,7	4,0	2,4	2,8
1989	1,8	1,4	1,6	1,9	1,9	1,9	2,1	2,1	2,6	2,4	2,0	1,9	2,0
1990	0,9	1,5	0,9	1,0	1,6	1,5	2,4	3,2	3,4	3,2	3,2	3,6	2,2
1991	3,7	3,0	2,4	2,1	2,0	2,7							
1992													
1993													
1994	2,1	1,4	2,7	2,7	1,3	2,5	2,8	3,9	4,5	4,5	4,0	2,9	2,9
1995	2,0	1,8	2,6	2,2	2,6	2,6	2,3	3,2	4,2	3,0	3,3	3,0	2,7
1996	2,2	2,9	2,2	2,9	2,8	2,7	2,7	2,6	3,9	3,4	3,3	2,5	2,8
1997	1,8	2,3		2,4	2,8	1,9	2,4	2,8	3,4	3,7	2,9	2,7	2,6
1998	2	2,3	2,3	2,6	2,6	2,8	3	2,6	3	3,5	3,6	2,3	2,7
1999	2	1,8	2,4	3,4	3,7	2,9	4,1	3,8	4,7	5,4	4,2	3,8	3,5
2000	2,5	2,5	3,1	2,3	1,8	1,5	1,7	2,9	3,8	2,9	2,8	3,2	2,6

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
MED 56/96	1,9	1,8	1,8	2,1	1,7	1,7	2,1	2,4	2,9	2,8	2,6	2,2	2,1
MED 61/90	1,7	1,6	1,7	1,9	1,5	1,4	2,0	2,2	2,7	2,7	2,5	2,1	2,0
MED 56/00	1,9	1,8	1,9	2,1	1,8	1,7	2,2	2,5	3,0	2,9	2,7	2,3	2,2

Apêndice 1

Geração Distribuída

Diferentes definições para a Geração Distribuída (GD) são usadas na literatura e na prática. O EPRI (Electrical Power Research Institute) a define como a geração de poucos quilowatts até 50 MW (EPRI, 1998). Já Ackermann *et al* (1999) fornece uma definição mais geral: “Geração distribuída é um sistema que gera energia elétrica, conectado diretamente à rede de distribuição ou no local da medição elétrica do consumidor”. Para tanto, podem ser usados:

- cogeneradores;
- geradores de emergência;
- geradores para operação no horário de ponta;
- painéis fotovoltaicos;
- pequenas centrais hidrelétricas - PCH's;
- aerogeradores;
- células de combustível;
- microturbinas;
- motores a combustão interna.

O conceito envolve equipamentos de controle e sistemas que articulam a operação dos geradores, o eventual controle de cargas (ligamento/desligamento) para que estas se adaptem à oferta de energia.

A GD tem a vantagem sobre a geração central por economizar investimentos em transmissão e reduzir as perdas nestes sistemas, melhorando a estabilidade do serviço de energia elétrica.

A geração elétrica perto do local de consumo foi a regra na primeira metade do século, quando a energia industrial era praticamente toda gerada localmente.

O aperfeiçoamento dos transformadores e das linhas de transmissão com tensões cada vez mais elevadas, permitiram economias de escala importantes e levaram ao desenvolvimento de geradores com potências cada vez maiores, atingindo os limites práticos de eficiência. Com isto, a geração a partir de unidades centralizadas praticamente dominou o processo de produção de eletricidade. Devido às grandes dimensões, indivisibilidade e a pouca flexibilidade desses empreendimentos, estas tecnologias influenciaram os modelos de exploração do setor elétrico que operavam com monopólios estatizados após a Segunda Guerra Mundial.

A esta estrutura interessava manter a grande geração central, perpetuando o mito das economias de escala na geração e reduzindo a GD aos casos onde o consumidor estava isolado dos sistemas. Os próprios fabricantes não investiam em GD, o que acabou reforçando e perpetuando o sistema de "monopólio natural" na geração.

As crises do petróleo introduziram fatores perturbadores que mudaram irreversivelmente este panorama, revelando a importância, por exemplo, da economia de escopo obtida na co-geração. A partir da década de 90, foi introduzido o conceito de competição no serviço de energia elétrica que cria a concorrência e estimula todos os potenciais elétricos com custos competitivos.

Novos equipamentos começam a ser produzidos, mostrando a atratividade da GD em diversos países como a Holanda e Finlândia, onde esta forma de geração supre mais de 40% das necessidades de energia elétrica nacionais. A introdução desta geração na maioria dos países tem sido lenta pois os mercados evoluem a taxas muito pequenas e a geração central, com seus imobilizados já realizados dificulta a competição.

Apêndice 2

Legislação a respeito de Energia Eólica

Lei de Regulamentação do Produtor Independente e Auto Produtor

O Decreto nº 2.003, de 10 de setembro de 1996, regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e Autoprodutor viabilizando assim a execução dos artigos 11 e seguinte da Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995, que "estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões⁵² de serviços públicos além de outras providências". O Decreto regulamenta a concessão de energia elétrica para pessoa jurídica ou consórcio de empresas, destinada parcial ou totalmente ao comércio ou exclusivamente para consumo do próprio produtor.

Esse Decreto trata, de uma forma bem ampla, o fornecimento de energia elétrica pela iniciativa privada. Algumas restrições e observações são feitas para sistemas hidrelétricos e térmicos. Mesmo não explicitando e regulamentando restrições e autorizações para fontes alternativas de energia, esse Decreto é de fundamental importância na regulamentação também de Autoprodutores e Produtores Independentes que se utilizem fontes alternativas de energia para geração e venda de energia.

⁵² Os termos concessão e permissão são conceitos do Direito Administrativos. Ambas as categorias são espécies de gênero "serviços delegados", diferenciando-se uma da outra quanto à forma e às garantias. Segundo Helly Lopes Meirelles (Direito Administrativo Brasileiro, 18ª Edição, Malheiros, São Paulo, 1993), "a concessão é delegação contratual e, modernamente, legal; a permissão e a autorização constituem delegações por ato unilateral da Administração, aquela com maior formalidade e estabilidade para o serviço; esta com mais simplicidade e precariedade na execução".

Os novos projetos de incentivos à geração eólica procuram criar maneiras de incentivar a criação de Produtores Independentes de energia para a livre comercialização no mercado de energia elétrica.

A Resolução da ANEEL sobre os Valores Normativos

A Resolução ANEEL nº 233, de 29 de julho de 1999, estabelece os Valores Normativos que limitam o repasse dos preços para as tarifas de fornecimento. Foi estabelecido um valor específico para diversas fontes geradoras de energia como as termelétricas a carvão nacional, as pequenas centrais hidrelétricas, as termelétricas a biomassa, a energia eólica e a solar fotovoltaica.

Os Valores Normativos mostrados na Tab. 1 poderão ser revistos e alterados anualmente segundo critérios da ANEEL ou quando ocorrerem mudanças significativas em uma das diversas fases que compõem a geração elétrica. As mudanças nos Valores Normativos também deverão considerar os projetos em desenvolvimento, as expansões previstas do parque gerador, a utilização dos custos dos empreendimentos, os contratos bilaterais firmados entre os agentes e as políticas e diretrizes do Governo Federal.

Tabela Ap 2.1- Valores normativos (referência Janeiro/2001)

Fonte	Valor Normativo	
	R\$/MWh	US\$/MWh
Competitiva	72,35	36,85
Termelétrica a Carvão Nacional	74,86	38,13
Pequena Central Hidrelétrica	79,29	40,39
Termelétrica Biomassa	89,86	45,77
Eólica	112,21	57,15
Solar fotovoltaica	264,12	134,53

Fonte: ANEEL (2001a)

Um dos grandes avanços no estabelecimento dos Valores Normativos está na viabilização das condições necessárias a distribuidores e geradores na celebração dos contratos bilaterais de

longo prazo para compra e venda de energia garantindo, desta forma, a expansão do parque gerador e também a modicidade das tarifas.

Os Benefícios da CCC

Visando viabilizar a geração térmica dentro dos níveis tarifários atualmente praticados no Brasil e manter um patamar tarifário razoavelmente homogêneo nos diversos estados brasileiros, reduzindo as disparidades para aqueles de base predominantemente termelétrica, as empresas concessionárias de todo o país financiam parcialmente, através de um subsídio cruzado, a geração em plantas térmicas a combustíveis fósseis (carvão, óleo diesel e óleo combustível). Esse mecanismo é conhecido como Conta de Consumo de Combustíveis – CCC, e é administrado pela ELETROBRÁS. A CCC é constituída a partir de quotas pagas pelas concessionárias e o rateio é feito de forma proporcional à energia comercializada por cada uma delas. A cada ano a ELETROBRÁS faz uma previsão orçamentária baseada no custo do combustível – posto na capital de cada estado beneficiário, na previsão de demanda nas diversas localidades atendidas e em índices de desempenho das usinas (Consumo específico).

Em 11 de agosto de 1999, a Resolução nº 245 da ANEEL estabeleceu as condições e prazos para a sub-rogação dos benefícios do rateio da Conta de Consumo de Combustíveis – CCC aos projetos a serem estabelecidos em sistemas elétricos isolados em substituição à geração termelétrica que utilize derivados de petróleo. A resolução permitiu o uso dos recursos da CCC em substituição total ou parcial, assim como para atendimento a novas cargas devido à expansão do mercado. Foram listados explicitamente: (i) aproveitamentos hidrelétricos de potência superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, caracterizados como pequena central hidrelétrica, e (ii) outros empreendimentos de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas que façam uso de recursos naturais renováveis. Foi definido o conceito de Energia de Referência, que será estabelecida para cada projeto pela ANEEL com base no mercado atendido e na demanda reprimida existente e na disponibilidade de energia de longo prazo do empreendimento. Finalmente, foram definidos os valores mensais dos recursos que poderiam fluir aos beneficiários qualificados e os prazos de utilização desses benefícios.

O Projeto de Lei do Senador Edson Lobão envolvendo a criação de fundos para fontes alternativas de energia

O Projeto de Lei do Senado nº 27, de 1996, de autoria do Senador Edson Lobão regulamenta a criação de um Programa de Incentivos a Energias Renováveis – PIER que visa promover o desenvolvimento das energias termosolar, fotovoltaica e eólica objetivando sua produção e utilização em sistemas isolados de pequeno porte. O PIER também procura incentivar a utilização da energia solar para o aquecimento de água evitando assim o consumo de energia elétrica destinado ao mesmo fim. O estabelecimento de cooperativas de produtores e usuários de energia eólica e solar também são metas de incentivos e estímulos do Programa.

Resolução Nº 24 - Programa Emergencial de Energia Eólica - PROEÓLICA

Em 5 de julho de 2001, o presidente da câmara de gestão da crise de energia elétrica - GCE, faz saber que a câmara, no uso de suas atribuições e nos termos dos arts. 2o, 5o, 13 e seguintes da medida provisória no 2.198-3, de 28 de junho de 2001, adotou a resolução nº 24 a qual estipula que fica criado o Programa Emergencial de Energia Eólica - PROEÓLICA no território nacional, com os seguintes objetivos:

- viabilizar a implantação de 1.050 MW , até dezembro de 2003, de geração de energia elétrica a partir de fonte eólica, integrada ao sistema elétrico interligado nacional;
- promover o aproveitamento da fonte eólica de energia, como alternativa de desenvolvimento energético, econômico, social e ambiental;
- promover a complementaridade sazonal com os fluxos hidrológicos nos reservatórios do sistema interligado nacional.

Para alcançar os objetivos do programa, fica estabelecido que a ELETROBRÁS, diretamente ou por intermédio de suas empresas coligadas, deverá, por um prazo mínimo de quinze anos, contratar a aquisição da energia a ser produzida por empreendimentos de geração de energia eólica, até o limite de 1.050 MW e serão firmados convênios e acordos de cooperação com instituições públicas e privadas sendo que. caberá ao Ministério de Minas e Energia promover, coordenar e implementar o programa.

Substitutivo ao Projeto de Lei nº 2905-2000

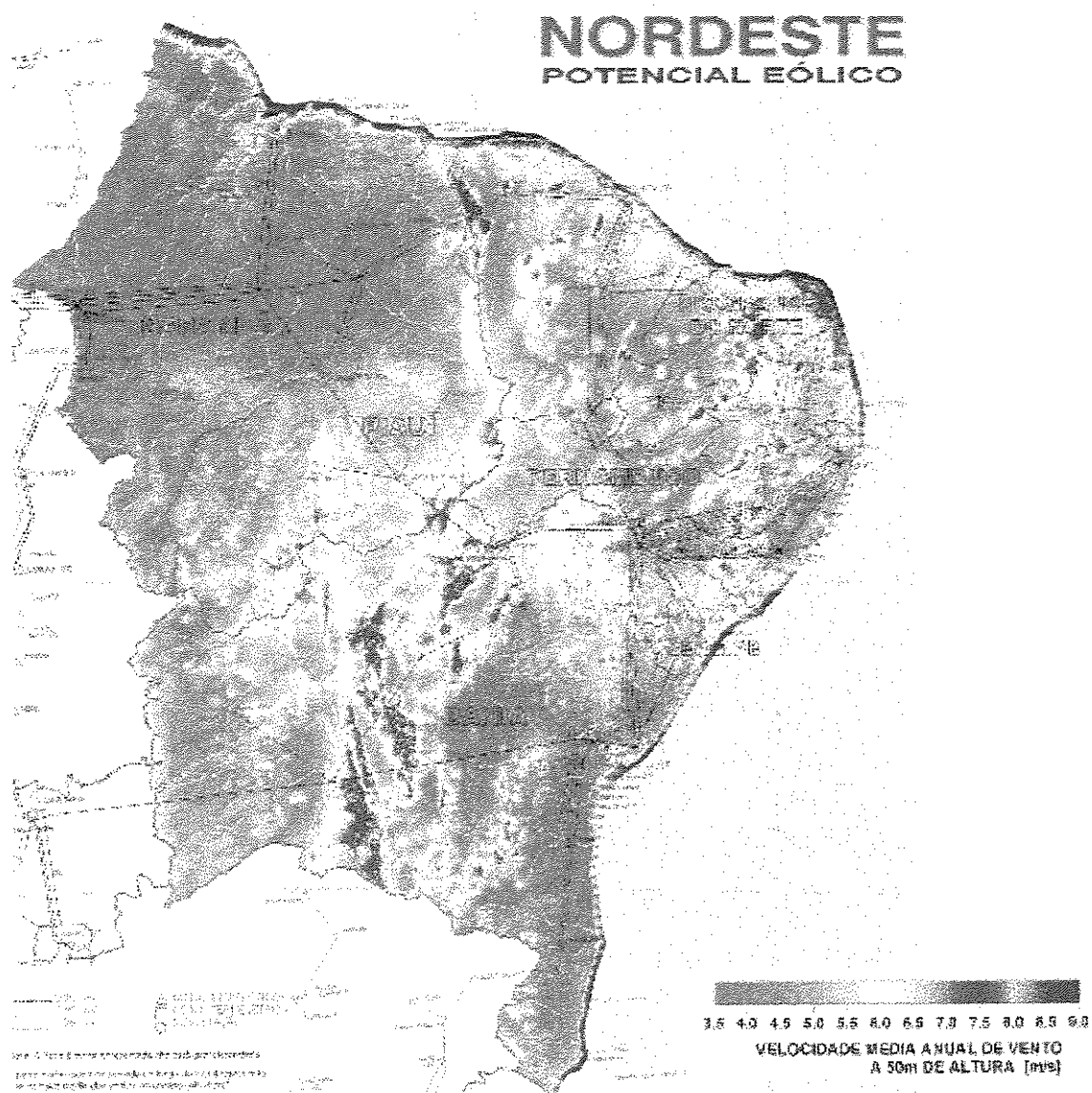
O Substitutivo ao Projeto de Lei nº 2.905 de 2000, na forma apresentada pelo seu redator, o então Deputado Federal José Carlos Aleluia, mostra-se uma das mais importantes iniciativas legislativas para o desenvolvimento e competitividade das fontes renováveis de energia: energia solar, energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas - PCH.

Trata-se, sem dúvida, de uma das mais importantes iniciativas para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia no Brasil. Entre os vários pontos contemplados pelo Substitutivo destacam-se:

- Diferenciação de valores de referência de geração para as fontes renováveis e de tarifas de suprimento e fornecimento para cooperativas, permissionários e autorizadas, em função de parâmetros técnicos e econômicos;
- Estabelecimento da Conta de Desenvolvimento Energético visando promover o desenvolvimento energético dos Estados e a competitividade da energia produzida a partir de fontes renováveis;
- Estímulo à substituição do uso dos derivados de petróleo, em particular nos motores a diesel, para a geração de energia elétrica;
- Extensão aos empreendimentos a partir de fontes eólica, solar e biomassa dos mesmos incentivos anteriormente concedidos às PCHs;
- Extensão às fontes renováveis do acesso aos financiamentos, com recursos do setor elétrico, nas mesmas condições dispensadas a outras atividades do setor;
- Obrigatoriedade de compra, pelas concessionárias, da energia gerada através do uso de fontes renováveis até o limite de 10% dos seus mercados de fornecimento, garantindo condições econômicas mínimas de geração e contribuindo para a universalização do serviço público de energia elétrica;
- Obrigatoriedade do estabelecimento de metas pelas concessionárias e permissionárias para a universalização do serviço público de energia elétrica;
- Proposição da realização de licitação para contratação de permissões, mesmo em áreas já concedidas, inclusive com a utilização de mecanismo de subcontratação, com vistas a garantir a referida universalização do atendimento aos consumidores.

Apêndice 3 – Mapa Eólico da Região Nordeste

Fonte: Dutra (2001).



Apêndice 3a – Mapa Eólico do Brasil



Apêndice 4

Novas usinas eólicas no Brasil

Fonte: ANEEL (2001b)

A ANEEL autorizou a construção de 20 novas usinas eólicas (primeiro lote) que, juntas, terão capacidade de geração de 1.773 MW. A maior parte dos empreendimentos, 18, será construída na região Nordeste, nos estados do Rio Grande do Norte, Ceará, Pernambuco e Bahia. Duas usinas serão construídas no estado do Rio de Janeiro. Das 20 novas centrais, 13 serão construídas pela Enerbrasil Energias Renováveis do Brasil Ltda, empresa ligada ao grupo espanhol Cia Americana de Energias Renovables S/A. A empresa SIIF Énergies Brasil Ltda, afiliada do grupo francês SIIFELEC, será responsável pelas outras sete usinas. Sediadas no Rio de Janeiro, as duas empresas atuarão como produtores independentes, podendo comercializar livremente a energia elétrica gerada pelas novas usinas.

No segundo lote, 23 usinas autorizadas, oito estarão localizadas no Ceará, oito no Rio Grande do Norte, cinco em Pernambuco e duas na Bahia. Os parques eólicos deverão entrar em operação entre julho de 2002 e dezembro de 2005, de acordo com cada empreendimento. O investimento previsto para construção das 23 usinas é da ordem de R\$ 4,7 bilhões. Cinco empresas – CPL Participações, Enerbrasil Energias Renováveis do Brasil, Fuhrlander, New Energy Options e Cooperativa de Energia, Comunicação e Desenvolvimento do Vale do Sirigi (Cersil) – serão as responsáveis pelos empreendimentos.

As autorizações concedidas fazem parte do esforço empreendido pela Aneel de incentivar a geração de energia elétrica com a utilização de fontes alternativas, como a força dos ventos e a luz solar. Além de serem renováveis, essas fontes garantem a produção da chamada “energia limpa”, de baixo impacto ambiental.

Abaixo, a relação das 43 usinas com respectivas potência, localização e previsão de entrada em funcionamento:

Lote 1	
Empreendimento: Parque Eólico BA 3 – Caetité Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Caetité (BA) Entrada em operação: 31/12/2003	Empreendimento: Central Eólica do Pecém Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 31,20 Município(s): Caucaia (CE) Entrada em operação: 31/07/2002
Empreendimento: Central Eólica Maceió Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 235,80 Município(s): Maceió de Itapipoca (CE) Entrada em operação: 31/12/2003	Empreendimento: Parque Eólico Salgada Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Paraipaba (CE) Entrada em operação: 31/12/2004
Empreendimento: Parque Eólico CE 4 – Lagoinha Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 49,30 Município(s): Paraipaba e Trairi (CE) Entrada em operação: 31/12/2003	Empreendimento: Parque Eólico CE 7 – Icapuí Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 29,75 Município(s): Aracati (CE) Entrada em operação: 31/12/2003
Empreendimento: Central Eólica Redonda Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 300,60 Município(s): Icapuí (CE) Entrada em operação: 31/12/2003	Empreendimento: Parque Eólico PE 2 - Serra da Macambira Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Pesqueira e Poção (PE) Entrada em operação: 31/12/2004
Empreendimento: Parque Eólico Serra do Orobó Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Pesqueira (PE) Entrada em operação: 31/12/2004	Empreendimento: Central Eólica Verdes Mares Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 158,40 Município(s): Tibau (RN) Entrada em operação: 31/12/2003
Empreendimento: Central Eólica Quintanilha Machado II – Pernambuco Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 39,60 Município(s): Arraial do Cabo (RJ) Entrada em operação: 31/12/2003	Empreendimento: Central Eólica Quintanilha Machado I – Massambaba Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 135,00 Município(s): Arraial do Cabo (RJ) Entrada em operação: 31/12/2003
Empreendimento: Central Eólica Fazenda Nova Empreendedor: SIIF Énergies Potência (MW): 180,00 Município(s): Porto do Mangue (RN) Entrada em operação: 31/12/2003	Empreendimento: Parque Eólico RN 3 – Gameleira Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 49,30 Município(s): Touros (RN) Entrada em operação: 31/12/2002

Empreendimento: Parque Eólico RN - 20 Serra do Mossoró Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 49,30 Município(s): Mossoró (RN) Entrada em operação: 31/12/2004	Empreendimento: Parque Eólico RN 6 – Macacos Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 49,30 Município(s): João Câmara (RN) Entrada em operação: 31/12/2004
Empreendimento: Parque Eólico RN - 1 – Mel Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 89,25 Município(s): Areia Branca (RN) Entrada em operação: 31/07/2002	Empreendimento: Parque Eólico RN 15 Rio do Fogo Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 49,30 Município(s): Maxaranguape (RN) Entrada em operação: 31/12/2002
Empreendimento: Parque Eólico RN 18 - Serra do Feiticeiro Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 39,95 Município(s): Lajes (RN) Entrada em operação: 30/12/2005	Empreendimento: Parque Eólico RN 5 – Calcanhar Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 49,30 Município(s): Touros (RN) Entrada em operação: 31/12/2003

Lote 2

Empreendimento: Central Eólica do Pirauá Empreendedor: Coop. de Energia, Comunic e Desenv.do V do Sirigi – CERSIL Potência (MW): 9,90 Município(s): Macaparana (PE) Entrada em operação: 31/07/2002 Investimento: R\$ 24,7 milhões	Empreendimento: Central Eólica do Pecém Empreendedor: CPL Participações Ltda. Potência (MW): 25,20 Município(s): Caucaia (CE) Entrada em operação: 01/07/2002 Investimento: R\$ 63 milhões
Empreendimento: Central Eólica da Volta do Rio Empreendedor: CPL Participações Ltda. Potência (MW): 42,00 Município(s): Acaraú (CE) Entrada em operação: 01/07/2002 Investimento: R\$ 105 milhões	Empreendimento: Central Eólica Praia do Morgado Empreendedor: CPL Participações Ltda. Potência (MW): 79,20 Município(s): Acaraú (CE) Entrada em operação: 01/07/2002 Investimento: R\$ 198 milhões
Empreendimento: Parque Eólico CE 11 – Camocim Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda. Potência (MW): 249,90 Município(s): Camocim (CE) Entrada em operação: 31/12/2003 Investimento: R\$ 624,7 milhões	Empreendimento: Parque Eólico BA 2 – Costa Dourada Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 99,45 Município(s): Mucuri (BA) Entrada em operação: 31/12/2004 Investimento: R\$ 248,6 milhões
Empreendimento: Parque Eólico RN 4 – Pititinga Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 149,60 Município(s): Maxaranguape (RN) Entrada em operação: 31/07/2002 Investimento: R\$ 374 milhões	Empreendimento: Parque Eólico CE 3 – Boca do Poço Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 79,90 Município(s): Jaguaruana (CE) Entrada em operação: 30/12/2005 Investimento: R\$ 199,7 milhões
Empreendimento: Parque Eólico RN 14 – São Bento do Norte Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 59,50 Município(s): São Bento do Norte (RN) Entrada em operação: 31/12/2003 Investimento: R\$ 148,7 milhões	Empreendimento: Parque Eólico PE 1 – Marcolândia Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 59,50 Município(s): Araripina (PE) Entrada em operação: 31/12/2003 Investimento: R\$ 148,7 milhões

Empreendimento: Parque Eólico CE 5 – Apodi Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 99,45 Município(s): Limoeiro do Norte (CE) Entrada em operação: 31/12/2003 Investimento: R\$ 248,6 milhões	Empreendimento: Parque Eólico CE 10 – Acaraú Empreendedor: Enerbrasil Energias Renov. Do Brasil Ltda Potência (MW): 49,30 Município(s): Acaraú (CE) Entrada em operação: 31/12/2003 Investimento: R\$ 123,2 milhões
Empreendimento: Parque Eólico BA 1 – Conde Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Limoeiro do Norte (CE) Entrada em operação: 31/12/2003 Investimento previsto: R\$ 148,7 milhões	Empreendimento: Parque Eólico PE 3 – Poção Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Poção (PE) Entrada em operação: 20/10/2003 Investimento previsto: R\$ 148,7 milhões
Empreendimento: Parque Eólico RN 17 – Serra de Santana Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 99,45 Município(s): Lagoa Nova (RN) Entrada em operação: 31/12/2004 Investimento previsto: R\$ 248,6 milhões	Empreendimento: Parque Eólico RN 11 – Guamaré Fases I e II Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 249,90 Município(s): Guamaré (RN) Entrada em operação: 31/07/2002 Investimento previsto: R\$ 624,7 milhões
Empreendimento: Parque Eólico RN 19 – Juremal Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Baraúna (RN) Entrada em operação: 31/12/2004 Investimento previsto: R\$ 148,7 milhões	Empreendimento: Parque Eólico RN 10 – Três Irmãos Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): São Bento do Norte (RN) Entrada em operação: 31/12/2004 Investimento previsto: R\$ 148,7 milhões
Empreendimento: Parque Eólico PE 6 – Buíque Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Buíque (PE) Entrada em operação: 31/12/2004 Investimento previsto: R\$ 148,7 milhões	Empreendimento: Central Eólica Alegria II Empreendedor: New Energy Options Potência (MW): 100,80 Município(s): Guamaré (RN) Entrada em operação: 30/11/2002 Investimento previsto: R\$ 252 milhões
Empreendimento: Parque Eólico do Pecém – São Gonçalo Empreendedor: Fuhlander Potência (MW): 46 Município(s): São Gonçalo do Amarante (CE) Entrada em operação: 31/12/2002 Investimento previsto: R\$ 115 milhões	Empreendimento: Central Eólica Alegria I Empreendedor: New Energy Options Potência (MW): 51 Município(s): Guamaré (RN) Entrada em operação: 30/11/2002 Investimento previsto: R\$ 127,5 milhões
Empreendimento: Parque Eólico PE 5 – Serra do Pau D'Arco Empreendedor: Enerbrasil Potência (MW): 59,50 Município(s): Arco Verde (PE) Entrada em operação: 31/12/2004 Investimento previsto: R\$ 148,7 milhões	