



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14002-PRE/9177

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO SUL DO BRASIL

Rafael Fettermann Bertagnolli*

* UFSM, bolsista CNPq/MCT

Relatório Final de Projeto de Iniciação Científica (PIBIC/INPE-CNPq/MCT) em substituição ao bolsista Marclo Pizzuti Pés (UFSM), orientado pelo Dr. Enio Bueno Pereira e co-orientado pelo Dr. Nelson Jorge Schuch.

INPE
São José dos Campos
2006



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO NO SUL DO BRASIL

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA PIBIC/INPE – CNPq/MCT

PROCESSO Nº 105407/2005-4

Rafael Fettermann Bertagnolli (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)

E-mail: rafaelb@lacesm.ufsm.br

Marcelo Pizzuti Pés (UFSM, Bolsista substituído)

E-mail: marcelo@lacesm.ufsm.br

Dr. Enio Bueno Pereira (CPTEC/INPE – MCT, Orientador)

E-mail: eniobp@cptec.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch (CRSPE/INPE – MCT, Co-orientador)

E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Santa Maria, Julho de 2006.



Dados de Identificação

Bolsistas:

Rafael Fettermann Bertagnoli, Bolsista, período de 03/2006 a 07/2006
Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Marcelo Pizzuti Pes, Bolsista substituído, período de 08/2005 a 02/2006
Acadêmico do Curso de Física Licenciatura
Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Processo CNPq: **105407/2005-4**

Orientador:

Dr. Enio Bueno Pereira
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/INPE – MCT.
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT.

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch
Pesquisador Titular do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais –
CRSPE/INPE – MCT.

Colaboradores:

Dra. Damaris Kirsch Pinheiro – LACESM/CT – UFSM
Dr. Fernando Ramos Martins – DMA/CPTEC/INPE – MCT
Me. Eng. Ricardo André Guarnieri – DMA/CPTEC/INPE – MCT



Locais de Trabalho/Execução do Projeto:

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT

Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – CRSPE/INPE – MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT

Trabalho desenvolvido no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do

Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM



Agradecimentos

Os bolsistas gostariam de agradecer aos colegas do Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do CRSPE/INPE - MCT pelo apoio e companheirismo, assim como a toda a equipe do Projeto SONDA, e ao Orientador Dr. Enio Bueno Pereira que possibilitaram e contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa. Agradecemos também aos patrocinadores do Projeto SONDA: FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, através do processo 22.01.0569.00 – e Petrobrás. Os bolsistas agradecem ao Dr. José Carlos Becceneri, Coordenador do Programa PIBIC/INPE-CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa. Agradecemos à secretária Angelita Tavares e a Dra. Damaris Kirsch Pinheiro, diretora do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, LACESM/CT – UFSM pelo incansável esforço dedicado a todos os alunos de IC & T. Por fim, os bolsistas gostariam de fazer um agradecimento especial ao Dr. Nelson Schuch pela co-orientação e apoio.



Sumário

Capítulo 1

INTRODUÇÃO.....	1
-----------------	---

Capítulo 2

OBJETIVOS	3
2.1. Objetivos do Projeto SONDA	3
2.2. Objetivo e Metas deste Projeto de IC	3

Capítulo 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1. Energias Renováveis.....	5
3.2. Energia Eólica.....	8
3.3. O Vento.....	8
3.3.1. Força de Gradiente de Pressão	9
3.3.2. Força de Coriolis	11
3.3.3. Força de Atrito.....	14
3.3.4. Ventos Geostróficos	14
3.3.5. Ventos na Camada de Atrito.....	15
3.3.6. Medição do Vento	16
3.4. Aerogeradores.....	18
3.4.1. Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica	18
3.4.2. Principais Componentes do Aerogerador	21
3.4.3. Modos de Operação de um Aerogerador.....	23
3.5. Avaliação e Análise dos Dados de Ventos	24
3.6. Comprimento de Rugosidade	28



Capítulo 4

METODOLOGIA.....	29
4.1. Projeto SONDA.....	29
4.1.1. Estações de Referência	30
4.1.2. Estações Solares	30
4.1.3. Estações Eólicas	30
4.2. Estação de Referência do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, RS.....	31
4.2.1. Torre Eólica.....	34
4.2.2. Anemômetros	34
4.2.3. Outros equipamentos da Estação SMS.....	37
4.3. Análise dos Dados	38
4.4. Avaliação do Potencial de uma Região.....	39

Capítulo 5

ATIVIDADES DOS BOLSISTAS.....	40
5.1. Revisão Bibliográfica	40
5.2. Operação dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS	40
5.2.1. Manutenção dos equipamentos SONDA.....	40
5.2.3. Troca de Sílica Gel	40
5.2.3. Limpeza e polimento	41
5.2.4. Instalação do Anemômetro de 10 metros	41
5.3. Dados	42
5.3.1. Coleta de dados.....	42
5.3.2. Redução e análise de dados	42
5.4. Realização de um perfil do potencial energético eólico da região central do Rio Grande do Sul.....	43
5.5. Visita Técnica ao CPTEC – INPE.....	43



5.5.1 – Palestras Técnicas da Equipe do Grupo de Pesquisa em Energia e Recursos Renováveis	43
5.5.2 – Treinamento para Uso do Software WASP	44
5.6. Participação em eventos de IC e publicações dos bolsistas	44

Capítulo 6

RESULTADOS OBTIDOS.....	47
6.1. Análise da distribuição e velocidade dos ventos a 25 e 50 metros.....	47
6.2. Emprego da função de distribuição de frequências de Weibull	48
6.3. Determinação do comprimento de rugosidade do terreno	49

Capítulo 7

CONCLUSÕES	51
------------------	----

Capítulo 8

ATIVIDADES FUTURAS	53
--------------------------	----

Referências Bibliográficas.....	54
---------------------------------	----

Índice de Figuras

Figura 3.1 – Sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. (a) Sistema Eólico; (b) Sistema Solar; (c) Sistema Hidráulico.	5
Figura 3.2 – Diagrama das fontes de energia renováveis.	6
Figura 3.3 – Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido.	10
Figura 3.4 – Sistema de coordenadas fixo à Terra.	11
Figura 3.5 – Componentes da Força de Coriolis.	13
Figura 3.6 – O efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul.	13
Figura 3.7 – O vento geostrófico no Hemisfério Sul.	15
Figura 3.8 – Efeito do atrito sobre o vento.	16
Figura 3.9 – Anemômetro de conchas.	16
Figura 3.10 – Anemômetro de hélice.	17
Figura 3.11 – Variação da massa através da área de varredura.	19
Figura 3.12 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.	20
Figura 3.13 – Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica.	20
Figura 3.14 – Velocidade Específica para tipos de turbinas eólicas.	21
Figura 3.15 – Principais componentes de um Aerogerador.	21
Figura 3.16 – Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador.	23
Figura 3.17 – Exemplo de distribuição estatística para dados de ventos.	24
Figura 3.18 – Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh.	26



Figura 3.19 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.	27
Figura 4.1 – Distribuição das estações SONDA no Território Nacional Brasileiro.....	29
Figura 4.2 – Plataforma da Estação de Referência SONDA - SMS ao lado do Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul do Centro Regional de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT em São Martinho da Serra, RS.....	31
Figura 4.3 – Caixa do Datalogger junto ao computador SONDA no prédio 1 do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra.	32
Figura 4.4 – Diagrama dos equipamentos da Estação SONDA - SMS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT.	33
Figura 4.5 – Torre Eólica da Estação SMS com a posição dos três anemômetros no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT.	34
Figura 4.6 – Anemômetro <i>R. M. Young</i> modelo 05106.....	35
Figura 4.7 – Diagrama do “Wind Line Driver”.....	36
Figura 4.8 – Conjunto de medida de dados eólicos da Estação SONDA – SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.....	36
Figura 4.9 – Diagrama do sensor de medida de velocidade e direção de vento.....	37
Figura 6.1 – Sentidos predominantes das direções dos ventos a 25 metros (a) e 50 metros (b) de altura, observados no Observatório Espacial do Sul.....	47
Figura 6.2 – Distribuição de Weibull para altura de 25 metros.....	48
Figura 6.3 – Distribuição de Weibull para altura de 50 metros.....	49



Índice de Tabelas

Tabela 1.1 – Percentual de utilização de Energia Renovável.....	7
---	---



Siglas e Abreviaturas

CRSPE	- Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
CPTEC	- Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos
IC	- Iniciação Científica
IEA	- International Energy Agency
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LIM	- Laboratório de Instrumentação Meteorológica
LRER	- Laboratório de Recursos de Energias Renováveis
mA	- Mili-Ampères
OES	- Observatório Espacial do Sul
PMOA	- Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico
PROINFA	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia
SEMC	- Secretaria de Energia, Minas e Comunicações
SMS	- São Marinho da Serra
SONDA	- Sistema de Organização de Dados Ambientais
UFSM	- Universidade Federal de Santa Maria
WASP	- Wind Atlas Analysis and Application Program

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O mundo se depara com uma irreversível escalada do preço dos combustíveis fósseis. As principais causas desse efeito são: a grande disputa pelo controle dessas reservas de energia não renovável e a crescente demanda do mundo por energia, a fim de sustentar o atual desenvolvimento socioeconômico. Conseqüentemente, se essa questão não for solucionada, surgirão inúmeros problemas de caráter geopolítico, além dos já existentes, causados pela dependência a esses combustíveis. A manutenção das atuais matrizes energéticas possivelmente levará o mercado mundial a uma crise econômica nas próximas décadas, se as previsões de esgotamento do petróleo para este século se confirmarem (Bentley, 2002; Geller, 2003).

Além dos aspectos sócio-econômicos, existe a problemática ambiental, pois o uso contínuo de fontes convencionais contribui para o aquecimento global, apontado como um possível causador de mudanças climáticas em nosso planeta. Acordos internacionais, como o Protocolo de Kyoto, vêm sendo realizados, visando reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera e atenuar essas modificações climáticas.

O caminho para evitar tais problemas é a diversificação das fontes de energia, o uso racional e eficiente das mesmas, a inclusão de “energias limpas” e o desenvolvimento de novas tecnologias. Sendo assim, a exploração de fontes renováveis, provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, é apontada como uma solução, pois ocasiona baixo impacto ambiental e contribui para a independência energética.

Nesse contexto, o Brasil está em posição extremamente favorável, pois sua localização geográfica proporciona grandes riquezas naturais, capazes de fornecerem a energia limpa necessária para seu desenvolvimento. Como exemplo, pode-se citar o grande potencial hidráulico e eólico, as vastas áreas agricultáveis (capazes de gerar



grandes quantidades de biomassa, graças ao clima tropical), as maiores florestas tropicais e a cobertura solar durante quase todo o ano (Porto, 2004).

Entretanto, o cenário atual brasileiro não condiz com suas riquezas. O país, apesar de se destacar mundialmente por utilizar fontes de energia renováveis, concentra grande parte de sua matriz energética na energia hidráulica. A ausência de fontes complementares torna o setor energético vulnerável nos períodos de estiagem. Além disso, inexistem uma infra-estrutura aceitável para o desenvolvimento e exploração eficiente das demais fontes alternativas (Vidal, 2006).

Ciente desses problemas, programas governamentais foram e estão sendo criados para proporcionar investimentos seguros na exploração de fontes renováveis de energia. Um bom exemplo disso é o PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia – que prevê a instalação na 1ª fase de 3,3 GW de fontes alternativas até 2008, sendo 1,1 GW destinados para energia eólica.

Para que esses investimentos em energia alternativa, inclusive energia eólica, ocorram de forma eficaz, são necessários estudos que avaliem os locais de melhor aproveitamento para instalação e operação de unidades coletoras, usinas e sítios eólicos. Nesse contexto, o Projeto SONDA (www.cptec.inpe.br/sonda) objetiva a instalação e operação de uma rede de estações coletoras de dados de radiação solar e ventos, de maneira a fornecer os dados demandados pelas avaliações técnicas de inserção de energia solar e eólica.

O presente trabalho pretende analisar os dados de ventos obtidos no centro do Rio Grande do Sul, especialmente em uma estação de referência do Projeto SONDA, instalada no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT, no município de São Martinho da Serra - RS, a fim de desenvolver uma metodologia que permita avaliar o comportamento dos ventos e o potencial eólico na região. A aplicação futura desta metodologia em determinadas regiões contribuirá para o dimensionamento de futuros parques eólicos e, principalmente, permitirá a avaliação de suas viabilidades econômicas.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivos do Projeto SONDA

O SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais - é um Projeto coordenado e executado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, através do seu Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. O SONDA é financiado pela FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, através do Fundo Setorial de Energia - CT-ENERG. O principal objetivo é a implementação de uma infra-estrutura física e de recursos humanos destinada à montagem e melhoramento da base de dados de superfície necessária ao levantamento e planejamento do uso dos recursos de energia solar e eólica em todo o território brasileiro (SONDA, 2006).

2.2. Objetivo e Metas deste Projeto de IC

O objetivo principal deste Projeto de Iniciação Científica e Tecnológica é a avaliação do potencial eólico na região central do Rio Grande do Sul no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, no âmbito da parceria INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria, do Centro de Tecnologia da UFSM. E a criação de uma metodologia que possa vir a ser empregada em todo País através de outras estações SONDA. Sendo assim, o projeto pretende atingir as seguintes metas:

- Estudar o comportamento anual e sazonal do regime dos ventos na região do Observatório Espacial do Sul do CRSPE/INPE - MCT e realizar uma avaliação comparativa com Atlas Eólicos disponíveis;
- Determinar o comprimento de rugosidade do terreno e sua variação ao longo do ano e levantamento da topografia do terreno para futuro emprego do WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program);



Relatório Final de Atividades

- Trabalhar na validação e qualificação dos dados gerados pelos equipamentos;
- Compreender o funcionamento e operação dos anemômetros visando à obtenção de dados de grande confiabilidade;
- Realizar a manutenção periódica dos equipamentos;

Capítulo 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Energias Renováveis

As energias renováveis são provenientes de ciclos naturais de conversão da radiação solar, que é a fonte primária de quase toda energia disponível na Terra. Por isso, essas fontes de energia são consideradas “limpas” e virtualmente inesgotáveis. As formas ou manifestações mais conhecidas são: a energia solar, a energia eólica, a energia contida na biomassa e a energia potencial hidráulica.

O grande interesse no estudo dessas manifestações de energia é voltado à conversão em energia elétrica a fim de integrar os atuais sistemas elétricos ou disponibilizar eletricidade a lugares remotos. Desse modo, as energias renováveis servem de fontes para sistemas de geração de energia elétrica, como, por exemplo, os apresentados na Figura 3.1:

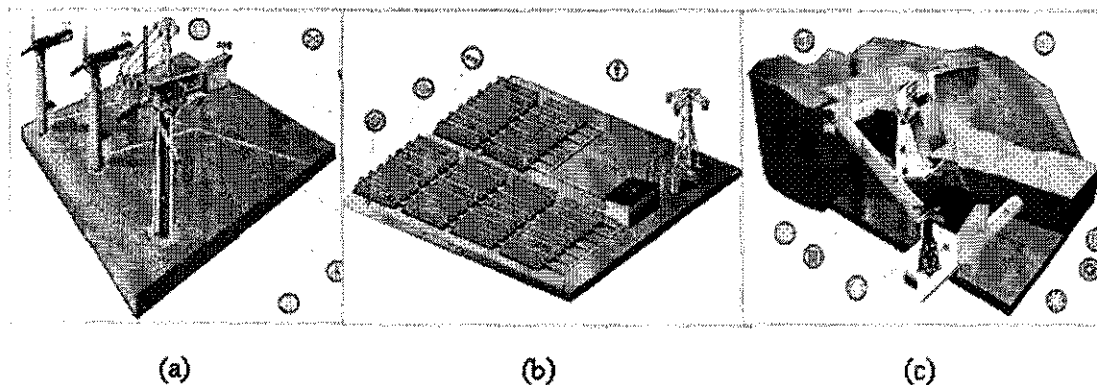


Figura 3.1 – Sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

(a) Sistema Eólico; (b) Sistema Solar; (c) Sistema Hidráulico.

Fonte: Modificado de ENEL (2006).

As energias renováveis têm o potencial técnico de atender grande parte da demanda incremental de energia do mundo, independente da origem da demanda (eletricidade, aquecimento ou transporte). Contudo, há três aspectos importantes a

Relatório Final de Atividades

serem considerados: a viabilidade econômica, a sustentabilidade de cada fonte e a disponibilidade de recursos renováveis para geração de energia, que variam entre as diferentes regiões do globo.

As regiões tropicais possuem forte incidência de radiação solar. Em termos de potencial eólico, este é mais pronunciado em as áreas planas, em especial as costeiras. Já a energia geotérmica é mais abundante nas regiões com atividade vulcânica intensa. Resíduos e lixo, passíveis de serem empregados na geração de energia térmica ou conversão em outras formas de energia, estão disponíveis em qualquer lugar habitado e tanto seu volume quanto o grau de concentração, aumentam com a urbanização. A principal discrepância ocorre na biomassa, onde poucos países dispõem de condições de ampliar a área de agricultura energética, sem competir com outros usos da terra, como alimentação, lazer, moradia, vias de transporte, reservas de proteção ambiental, etc. (Plano Nacional de Agroenergia, 2005).

Um diagrama das fontes de energias renováveis e seus tipos de aproveitamento é apresentado na Figura 3.2.

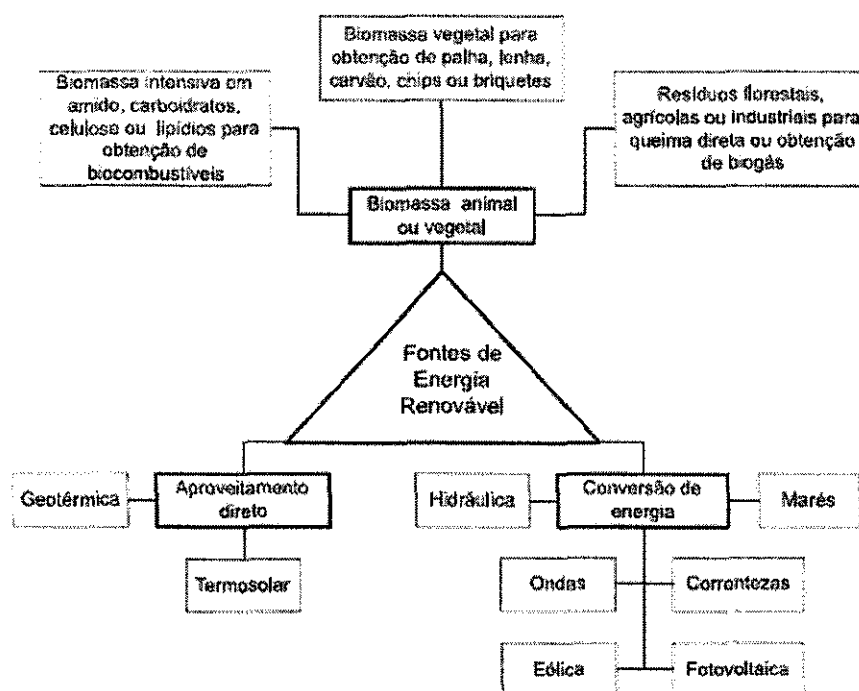


Figura 3.2 – Diagrama das fontes de energia renováveis.
Fonte: Plano Nacional de Agroenergia (2005).

Relatório Final de Atividades

As principais vantagens no uso dessas fontes de energias renováveis são:

- Redução na emissão de gases poluentes;
- Sustentabilidade;
- Alto grau de desenvolvimento tecnológico;
- Independência energética.

Apesar das vantagens apresentadas, o mundo atualmente depende excessivamente das fontes de energias convencionais. A Tabela 1.1 mostra o suprimento primário de energia de alguns países e o respectivo uso de energias renováveis. Baseado nessas estimativas da *International Energy Agency* (IEA - <http://www.iea.org/>) pode-se confirmar a baixa utilização de fontes renováveis de energia no mundo atualmente.

Nesse contexto, o Brasil se destaca por apresentar o maior percentual de utilização de energia renovável em sua matriz energética. Esse fato pode ser explicado devido ao grande aproveitamento da energia hidráulica no país. No entanto, a necessidade de uma diversificação vem despertando investimentos em outras formas de energia “limpa”, a fim de que seja obtida uma complementaridade dos recursos e a garantia de abastecimento de energia elétrica em todo o Brasil.

Pais	Suprimento Primário de Energia (TEP)	Energia Renovável (TEP)	Energia Renovável (%)
Argentina	57,6	6,2	10,8
Austrália	115,6	6,6	5,7
Brasil	185,1	66,4	35,9
França	265,6	18,6	7,0
Alemanha	351,1	9,2	2,6
Reino Unido	235,2	2,5	1,1
Estados Unidos	2.281,4	99,1	4,3
Mundo	10.038,3	1.351,9	13,5

Tabela 1.1 – Percentual de utilização de Energia Renovável.

Fonte: Plano Nacional de Agroenergia (2005).

3.2. Energia Eólica

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 (Energia Eólica – Princípios e Aplicações, 2006).

No entanto, a energia eólica é um recurso ainda pouco explorado no Brasil. Sua utilização não resulta na emissão de poluentes, e consiste na transformação inicial de energia de movimento do vento para energia mecânica de uma hélice – turbina eólica, e a conseguinte conversão em energia elétrica. No cenário mundial, a energia eólica tem apresentado um elevado crescimento nos últimos anos, principalmente devido a incentivos governamentais e ao alto grau de desenvolvimento e confiabilidade desta tecnologia (Marques, 2004).

Para geração de energia elétrica a partir dos ventos são necessários os seguintes elementos, para compor um sistema eólico:

- Recurso Eólico: ventos;
- Aerogeradores: equipamento eletromecânico responsável pela conversão da energia;
- Consumidor ou Armazenamento.

3.3. O Vento

O vento consiste na circulação de ar na atmosfera oriunda da energia solar. A radiação provoca aquecimento diferencial de porções de ar, criando os gradientes de pressão, geradores dos ventos. Para seu estudo, os ventos podem ser divididos em duas componentes: uma horizontal – Leste-Oeste ou Norte-Sul – e uma componente vertical – para cima e para baixo. Embora o comportamento vertical seja importante, especialmente para formação das nuvens, o componente horizontal é muito mais forte.

Por conveniência, neste estudo o termo “vento” será empregado apenas para denominar os movimentos horizontais.

Este movimento horizontal é causado pelas diferenças de pressão do ar atmosférico. Se a Terra não girasse e não houvesse atrito do ar com a sua superfície, a circulação horizontal de ar seria simplesmente das regiões de maior pressão para as regiões de menor pressão. No entanto, esses dois fatores existem e por isso os ventos são controlados pela combinação das seguintes forças:

- Força do Gradiente de Pressão
- Força de Coriolis
- Força de Atrito

Nos próximos itens, essas forças serão teoricamente descritas, de acordo com Lutgens e Tarbuck (1995).

3.3.1. Força de Gradiente de Pressão

Um gradiente de pressão existe quando a pressão do ar varia de uma região para outra. Se um elemento de fluido está sujeito a uma pressão maior de um lado que no outro, a variação espacial de pressão ocasiona o surgimento de uma força, no sentido de promover um equilíbrio de pressão. Para deduzir a expressão dessa força, pode-se considerar um pequeno bloco de fluido com dimensões Δn , Δs e Δz , como mostra a figura 3.3. O sistema de coordenadas é tal que o eixo s é paralelo às isóbaras, o eixo n aponta na direção da pressão mais alta e o eixo z aponta para cima. A força da pressão exercida pelo ar ambiente sobre a face esquerda do bloco é $p\Delta s\Delta z$, onde p é pressão sobre esta face. Na face oposta há uma força oposta, devido à pressão do ar ambiente, dada por $(p + \Delta p)\Delta s\Delta z$. Supondo que Δn seja suficientemente pequeno para que se possa considerar que a taxa de variação da pressão com a distância, $\partial p/\partial n$, seja constante sobre Δn , pode-se escrever:

$$\Delta p = \frac{\partial p}{\partial n} \Delta n \quad (3.1)$$

Onde $\partial p/\partial n$, a taxa de variação da pressão na direção n , é a derivada parcial de p em relação a n , considerando s e z como constantes.

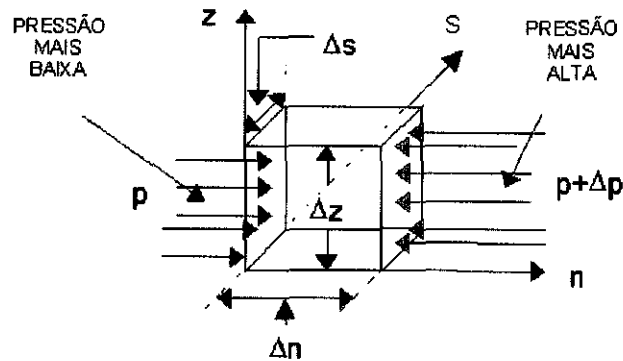


Figura 3.3 – Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido.
Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

O componente n da força de pressão resultante sobre o bloco, é a soma vetorial sobre as duas faces opostas:

$$p\Delta s\Delta z - \left(p + \frac{\partial p}{\partial n} \Delta n \right) \Delta s\Delta z = -\frac{\partial p}{\partial n} \Delta n\Delta s\Delta z \quad (3.2)$$

O sinal negativo indica que a força resultante aponta no sentido negativo do eixo n , ou seja, da pressão mais alta para a pressão mais baixa. Dividindo pela massa do bloco, $\rho\Delta n\Delta s\Delta z$, onde ρ é a densidade do ar, obtém-se a componente n da força de gradiente de pressão por massa unitária:

$$F_{pn} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.3)$$

Quando um gradiente de pressão, $\partial p/\partial n$ se desenvolve, o ar tende a mover-se das regiões de pressão mais alta para as de pressão mais baixas, de maneira a eliminar o gradiente de pressão. Sendo assim, o gradiente horizontal de pressão é a força geradora do vento. As demais forças que atuam sobre os ventos servirão para modificar o movimento e não produzi-lo.

3.3.2. Força de Coriolis

A lei de Newton da dinâmica é válida apenas para sistemas de coordenadas inerciais. Ao se estudar movimentos em um sistema de referência não-inercial, surgem forças aparentes, decorrentes das acelerações experimentadas pelo sistema de coordenadas. Em geral, para facilitar o estudo dos movimentos atmosféricos, adota-se um sistema de coordenadas fixo à superfície terrestre (como apresentado na Figura 3.4), que, devido à rotação da Terra sobre seu eixo, constitui-se um sistema não-inercial. Assim, decorrentes da aceleração centrípeta da rotação terrestre, surgem duas forças aparentes que agem sobre as parcelas de ar: a força de Coriolis e a força centrífuga.

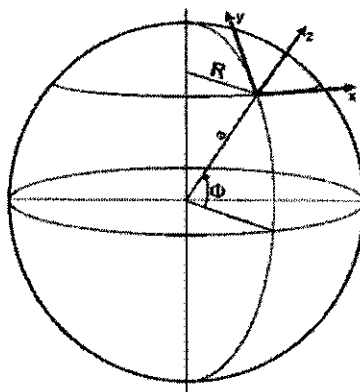


Figura 3.4 – Sistema de coordenadas fixo à Terra.
Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

A força centrífuga atua na direção perpendicular à superfície terrestre, somando-se vetorialmente à força de atração gravitacional verdadeira – existente entre a parcela de ar e a Terra – produzindo a gravidade efetiva ou gravidade. A força centrífuga atua tanto em corpos em repouso como em corpos em movimento em relação à superfície terrestre.

A força de Coriolis atua paralelamente à superfície da Terra, somente sobre corpos – ou parcelas de ar – em movimento, em relação ao sistema fixo à superfície. Atua sempre em direção perpendicular ao movimento, de modo a alterar apenas a direção do movimento.

Para demonstrar a existência da força de Coriolis que age sobre um objeto movendo-se sobre a superfície da Terra, pode-se considerar uma parcela de ar

movendo-se de Oeste para Leste, com velocidade u em relação à Terra, a qual possui velocidade angular de rotação de $\Omega = 2\pi \text{ rad/dia}$. Do ponto de vista de um observador externo à Terra, num sistema inercial, a parcela está se movendo ao longo de uma trajetória circular com velocidade $\Omega R + u$, onde R é a distância ao eixo de rotação da Terra e ΩR é a velocidade tangencial do sistema de coordenadas fixo à superfície terrestre. Como a parcela de ar está se movendo num círculo de raio R , com velocidade $\Omega R + u$, ela possui uma aceleração centrípeta dada por:

$$\frac{(\Omega R + u)^2}{R} \quad (3.4)$$

Para um observador que gira junto com a Terra, a aceleração aparente em direção ao eixo da Terra é apenas u^2/R . No entanto, a soma das forças reais, \vec{f} , por unidade de massa, é, segundo a 2ª Lei de Newton, aplicada pelo observador inercial:

$$\Sigma \vec{f} = -\frac{(\Omega R + u)^2}{R} \hat{R} = -\left(\Omega^2 R \hat{R} + 2\Omega u \hat{R} + \frac{u^2}{R} \hat{R} \right) \quad (3.5)$$

onde \hat{R} é o vetor unitário perpendicular ao eixo de rotação, dirigido do eixo para a parcela de ar. Portanto, para que o observador que gira com a Terra possa aplicar a 2ª Lei de Newton, é necessário introduzir duas forças aparentes por unidade de massa:

- Força centrífuga, $\Omega^2 R \hat{R}$, que modifica a força gravitacional;
- Força de Coriolis, $2\Omega u \hat{R}$.

A força de Coriolis, por sua vez, pode ser decomposta em duas componentes - vertical e horizontal – ambas funções da velocidade angular de rotação da Terra (Ω), da velocidade do objeto em movimento (u) e da latitude (ϕ), de acordo com a Figura 3.5. Essas componentes são calculadas de acordo com as seguintes equações:

$$-2\Omega u \sin \phi \quad (3.6)$$

na direção horizontal e

$$2\Omega u \cos \phi \quad (3.7)$$

na direção vertical.

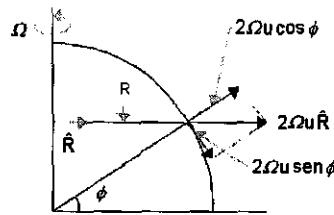


Figura 3.5 – Componentes da Força de Coriolis.
 Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

O componente vertical é muito menor que a força gravitacional, de modo que afeta muito pouco os movimentos verticais.

De maneira geral, pode-se dizer que o componente horizontal da força de Coriolis é dado por

$$F_{CO} = 2\Omega V \text{ sen}\phi \tag{3.8}$$

A força de Coriolis é sempre perpendicular à direção do movimento, induzindo desvio para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul. Esse desvio é diretamente proporcional à velocidade do vento.

Definida a força de Coriolis, pode-se entender melhor como ela atua nos deslocamentos de ar. Considerando um deslocamento no sentido pólo norte - equador, observa-se que ocorre um desvio para a direita do percurso, devido à rotação anti-horária do Hemisfério Norte, visto do espaço (Figura 3.6).

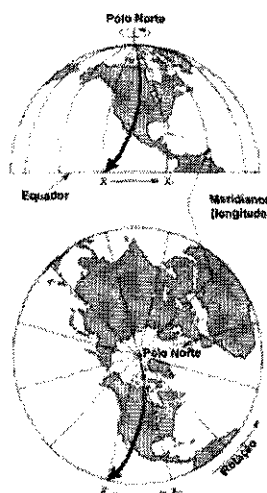


Figura 3.6 – O efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul.
 Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

Para um deslocamento de ar no sentido oeste – leste, a força de Coriolis depende da latitude. Quanto maior a latitude maior será a força de Coriolis, sendo nula no Equador e máxima nos pólos. Isto ocorre porque a força de Coriolis provém da rotação da Terra sobre seu eixo, que produz uma rotação do sistema de referência fixo à Terra. A rotação do sistema de referência fixo à Terra é máxima nos pólos e diminui com a latitude, até anular-se no equador.

3.3.3. Força de Atrito

A terceira força que atua sobre os ventos tem o efeito de reduzir, frear, o movimento do ar. A força de atrito tem influencia apenas nas camadas próximas a superfície e pode ser desconsiderada insignificante em grandes alturas.

3.3.4. Ventos Geostróficos

O vento geostrófico é um vento horizontal, não acelerado, que sopra ao longo de trajetórias retilíneas, que resulta de um equilíbrio entre a força do gradiente de pressão, horizontal, e a força de Coriolis. Este equilíbrio só é aproximadamente possível em altitudes nas quais o efeito do atrito possa ser desprezado, isto é, numa altitude de alguns quilômetros.

A Figura 3.7 ajuda a mostrar como o equilíbrio entre a força do gradiente de pressão e a força de Coriolis é atingido. Sob a ação da força do gradiente de pressão, perpendicular às isóbaras, as parcelas de ar começam a ser aceleradas da área de maior pressão para a área de menor pressão. Logo que o movimento se inicia, a força de Coriolis causa um desvio para a esquerda no Hemisfério Sul (e para a direita no Hemisfério Norte). A parcela continua a se acelerar, a velocidade aumenta e a força de Coriolis também, aumentando o desvio para a esquerda. Eventualmente as duas forças chegam ao equilíbrio, de modo que o vento passará a ter velocidade constante, paralela às isóbaras. Diz-se que foi atingido o balanço geostrófico.

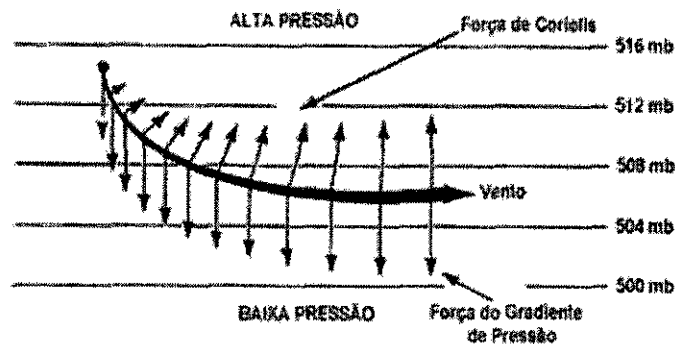


Figura 3.7 – O vento geostrófico no Hemisfério Sul.
Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

Na Atmosfera real os ventos nunca são puramente geostróficos. Contudo, a importância do vento geostrófico idealizado está no fato de que ele dá uma aproximação útil dos ventos superiores reais. Assim, medindo o campo de pressão em ar superior, os meteorologistas podem determinar a direção e velocidade do vento, pois a direção é paralela às isóbaras e a velocidade só depende do espaçamento entre isóbaras. Mais útil é o cálculo inverso: a determinação da distribuição da pressão a partir de medidas do vento. Essa inter-relação entre pressão e ventos aumenta a confiabilidade das cartas meteorológicas de ar superior, pois fornece mecanismos de verificação. Além disso, minimiza o número de observações diretas necessárias para descrever adequadamente as condições em ar superior, onde dados precisos são mais caros e difíceis de obter.

3.3.5. Ventos na Camada de Atrito

O atrito é importante apenas nos primeiros quilômetros da Atmosfera mais próximos da superfície. Ele atua freando o movimento do ar. Como a força de Coriolis é proporcional à velocidade do vento, ao diminuir esta velocidade o atrito reduz a força de Coriolis. Como a força de gradiente de pressão não é afetada pela velocidade do vento, surge um desequilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis, a favor da primeira. Portanto, o ar cruzará as isóbaras em direção à área de menor pressão, como na Figura 3.8. O ângulo de cruzamento dependerá da magnitude do atrito: em torno de 10° sobre os oceanos, onde há menos atrito, até 45° sobre terreno rugoso.

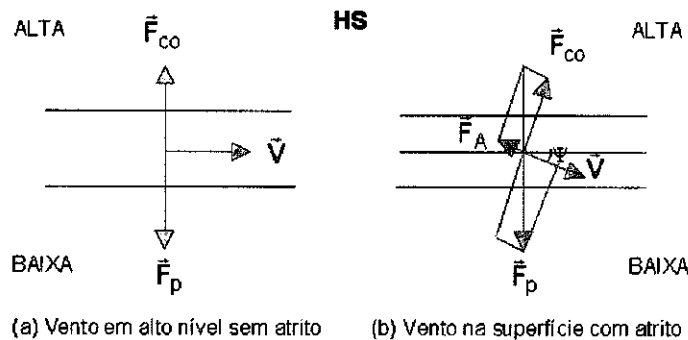


Figura 3.8 – Efeito do atrito sobre o vento.
Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

3.3.6. Medição do Vento

Uma das características do vento é o comportamento intermitente ao longo do tempo. Cabe aos instrumentos de medição do vento a tarefa de fornecer, com maior precisão, as velocidades alcançadas. Isto é feito em geral através da geração de um sinal, analógico ou digital, proporcional à velocidade do vento.

Os principais aparelhos para medição do vento são:

- Anemômetro de conchas

Este medidor de velocidade do vento pode ser entendido como um pequeno rotor eólico com eixo de rotação vertical; ao eixo são fixados braços que sustentam conchas (Figura 3.9). Através da rotação do eixo pode ser gerada uma tensão proporcional à rotação via tacômetro, ou podem ser gerados impulsos por rotação que são contados em um determinado intervalo de tempo. A principal vantagem deste equipamento é a robustez e o custo, que faz com que este medidor seja o mais utilizado em nível mundial.



Figura 3.9 – Anemômetro de conchas. Fonte: Rincondelvago (2006).

- Anemômetro de hélice

Este medidor é constituído por um rotor eólico de eixo horizontal, no qual a rotação, quando superado o efeito do atrito do mancal, é linearmente proporcional à velocidade do vento. O anemômetro de hélice pode ser do tipo leme simples (Figura 3.10), duplo ou formado por um conjunto de três hélices posicionadas em eixos ortogonais. A principal vantagem do instrumento é a possibilidade de medição da direção do vento via leme junto com a medição da velocidade do vento. A principal desvantagem do anemômetro de hélice com leme simples ou duplo é a indisponibilidade em situações de turbulência para acompanhar as variações da direção do vento; neste caso, verificam-se leituras de velocidade do vento inferiores à correta. Nos anemômetros de três eixos ortogonais o problema principal está na correção do sombreamento dos braços de suporte.

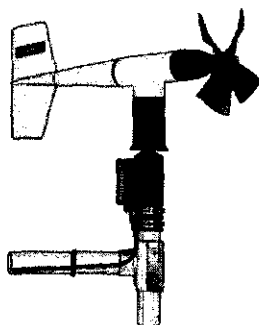


Figura 3.10 – Anemômetro de hélice. Fonte: Campbellsci (2006).

Todos os anemômetros utilizados para o levantamento de recursos eólico ou para uso em turbinas devem ter uma calibração atualizada. Calibrações que fornecem certificados padronizados são adequadas para propósitos de energia eólica, pois cada instrumento deve possuir certificado de calibração próprio (Carvalho, 2003).

3.4. Aerogeradores

3.4.1. Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante v (m/s), isto é, como o ar possui uma massa e se move em forma de vento, pode-se calcular a sua energia cinética, da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (3.9)$$

E: energia cinética (joules)

m: massa do ar (Kg)

v: velocidade do vento (m/s)

Como uma turbina eólica é classificada, normalmente, pela potência e não pela energia, tem-se:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (3.10)$$

P: potência disponível no vento (W)

t: tempo (s)

\dot{m} : taxa de variação de massa (Kg/s)

Quando uma massa de ar (m) passa através de uma área (A) em um intervalo de tempo (t), conforme Figura 3.11, a taxa de variação de massa é dada por:

$$\dot{m} = \rho A \frac{dx}{dt} = \rho A v \quad (3.11)$$

ρ : densidade do ar (Kg/m³)

A: área de varredura

Substituindo (3.11) em (3.10) tem-se a equação da potência disponível no vento.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (3.12)$$

A potência do vento é convertida em potência mecânica no rotor da turbina, havendo redução da velocidade do vento. Entretanto, a turbina eólica não pode extrair completamente a potência disponível no vento. Para que isso ocorresse, a velocidade do vento, atrás da área de varredura (v_2), deveria ser zero, ou seja, v_2 seria igual à zero. No entanto, isto não é possível, pois esta condição viola a lei da continuidade de massa. Por outro lado, se a velocidade do vento, atrás da área de varredura, for a mesma velocidade da frente (v_1) não houve redução da velocidade do vento e, conseqüentemente, a potência extraída pela turbina do vento é nula (Figura 3.11). Deste modo, entre estes dois extremos, deve haver um ponto ótimo de operação que garanta a máxima extração possível de energia, pela turbina eólica. Em 1926, Betz e Glauert descobriram que a máxima potência que pode ser extraída por uma turbina eólica é dada por (Hansen, 1998):

$$P_{\text{Max}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 c_{p,\text{Betz}} \quad (3.13)$$

$C_{p,\text{Betz}}$: Coeficiente de Potência de Betz, que vale aproximadamente 0,593.

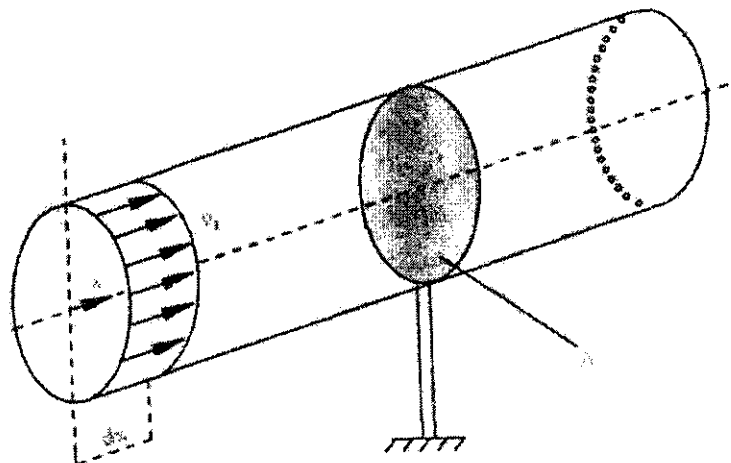


Figura 3.11 – Variação da massa através da área de varredura. Fonte: Marques (2004).

Isto significa que, se o processo de extração de energia do vento não tiver perdas, somente 59,3% da energia disponível no vento pode ser convertida em potência mecânica por uma turbina eólica. Na realidade, a extração de energia é menor, sendo a potência calculada pela utilização de um valor de c_p menor do que 0.593. As turbinas

eólicas modernas possuem valores de coeficiente de potência da ordem de 50% (Carvalho, 2003).

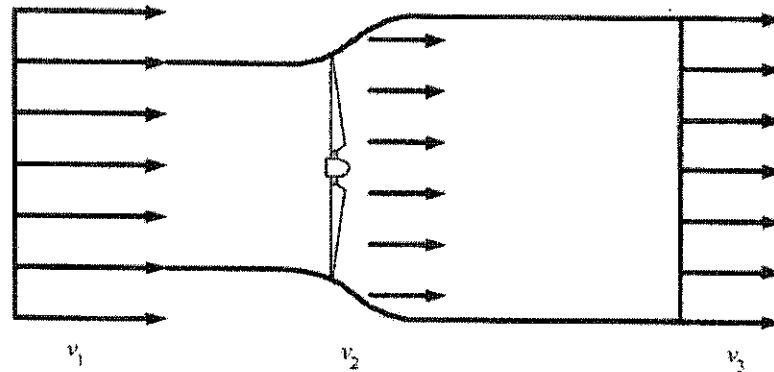


Figura 3.12 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.

Fonte: Marques (2004).

O coeficiente de potência é função da chamada velocidade específica λ . A velocidade específica representa a relação entre a velocidade de rotação da ponta da pá, v_u , e a velocidade do vento:

$$\lambda = \frac{v_u}{v} \quad (3.14)$$

A relação entre c_p e λ mostra que para apenas um valor de velocidade específica o coeficiente de potência é máximo, conforme mostra a Figura 3.13. (Carvalho, 2003)

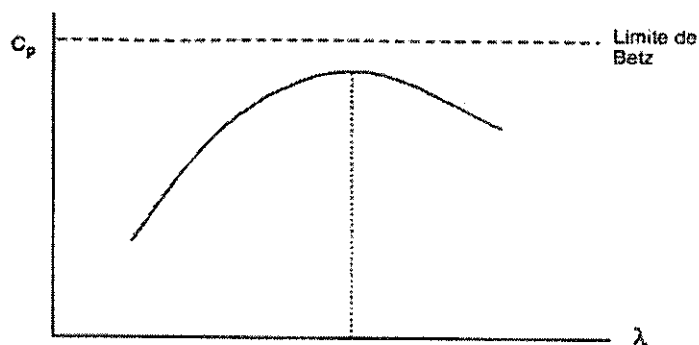


Figura 3.13 – Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica.

Fonte: Carvalho (2003).

O dimensionamento e quantidade de pás do aerogerador estão diretamente relacionados com a velocidade específica (λ). A Figura 3.14 mostra que quanto menor é o λ , maior é o número de pás, pois existe a necessidade de uma varredura mais sólida.

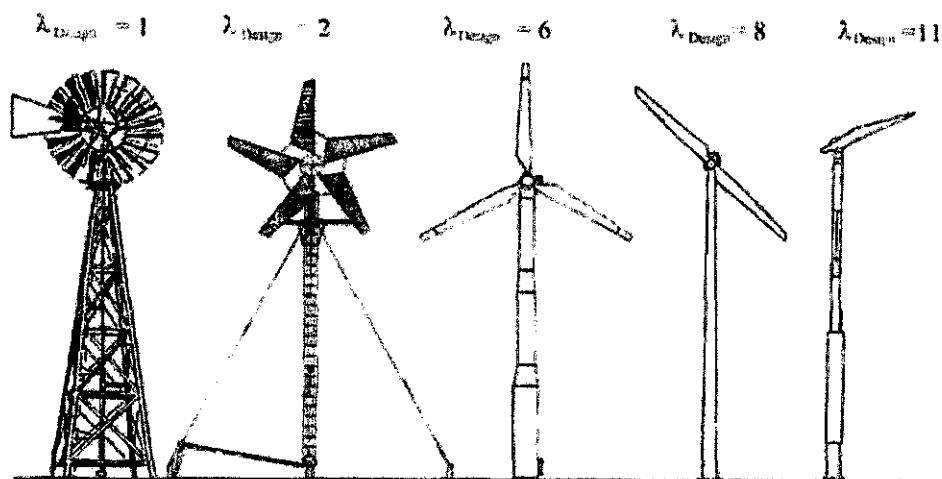


Figura 3.14 – Velocidade Específica para tipos de turbinas eólicas.
Fonte: Marques (2004).

3.4.2. Principais Componentes do Aerogerador

Os principais componentes da turbina eólica são apresentados na Figura 3.15:

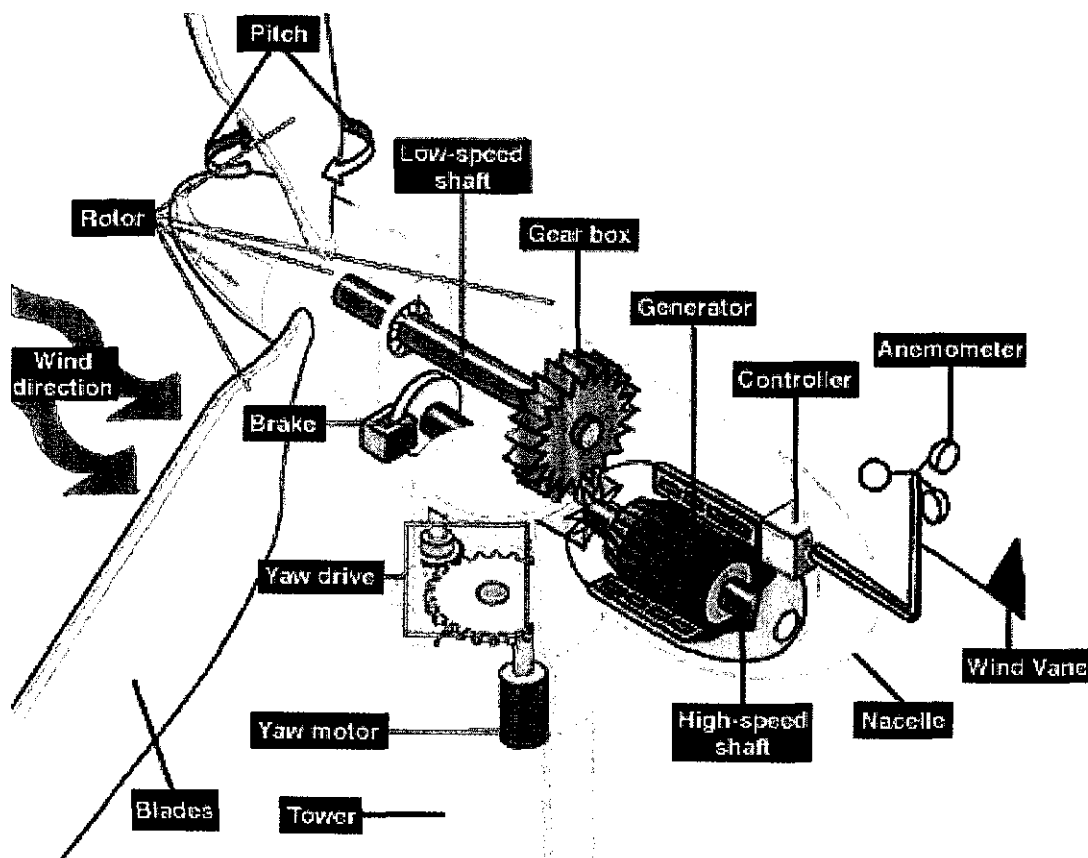


Figura 3.15 – Principais componentes de um Aerogerador. Fonte: NWTC (2004).

Anemômetro (*Anemometer*): mede a velocidade do vento e transmite para o controlador.

Pás (*Blades*): o vento incide sobre as pás gerando uma força de sustentação, que irá mover o rotor.

Freio (*Brake*): o freio a disco pode ser mecânico, elétrico ou hidráulico, e é utilizado como um sistema auxiliar para parar a turbina em condições adversas de operação.

Controlador (*Controller*): é utilizado para a partida e/ou desligamento da turbina, através do monitoramento de todas as partes da turbina.

Caixa de engrenagem (*Gear Box*): conecta o eixo de baixa velocidade com o eixo de alta velocidade e aumenta a velocidade rotacional de, aproximadamente, 10-60 rpm, para aproximadamente 1200-1800 rpm, que é a velocidade requerida para geradores assíncronos. Existem configurações que não utilizam caixa de engrenagem, devido à utilização de geradores que operam em baixa velocidade.

Gerador (*Generator*): o gerador mais utilizado para turbinas é o gerador assíncrono, embora algumas turbinas utilizem geradores síncronos.

Eixo de alta velocidade (*Low-speed shaft*): Aciona o gerador assíncrono.

Eixo de baixa velocidade (*High-speed shaft*): Devido à velocidade específica das turbinas, a velocidade de rotação do rotor está na faixa de 10 – 60 rpm.

Casa de máquinas (*Nacelle*): Protege todos os componentes da turbina incluindo o conjugado de acionamento, o gerador, mancais e demais acoplamentos (dependem da configuração da turbina).

Passo (*Pitch*): Utilizado para limitar a potência de saída para valores do vento acima da velocidade nominal eólica.

Rotor (*Rotor*): O rotor é constituído pelas pás e pelo cubo do rotor.

Torre (*Tower*): As torres podem ser feitas de aço tubular, de treliças ou de concreto. Como a velocidade do vento aumenta com a altura, as torres são altas para capturar mais energias.

Medidor de direção do vento (*Wind vane*): mede a direção do vento e comunica com o mecanismo de orientação direcional.

Mecanismo de orientação direcional (*Yaw drive*): utilizado para direcionar o rotor quando o vento muda de direção.

3.4.3. Modos de Operação de um Aerogerador

As turbinas eólicas operam sob um certo intervalo de velocidades do vento, extraindo do escoamento quantidades particulares de potência para cada velocidade, de acordo com a curva apresentada na Figura 3.16. Nesta figura, pode-se verificar que existem diferentes comportamentos na potência gerada para diferentes intervalos de velocidades do vento, definindo diferentes modos ou regiões de operação.

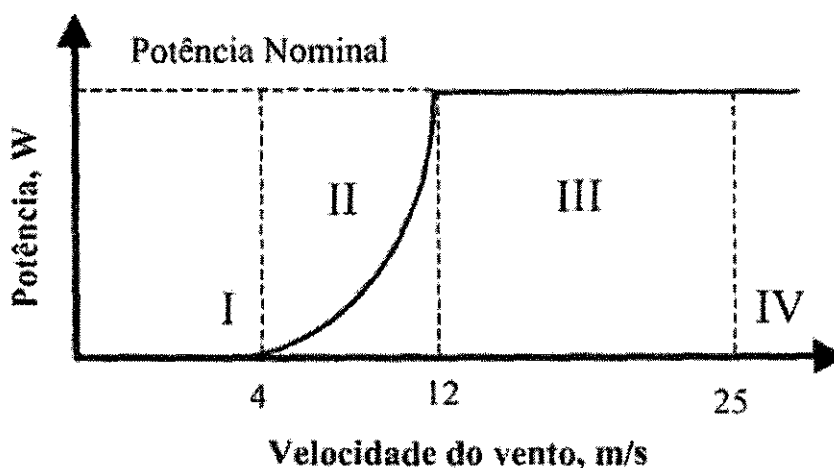


Figura 3.16 – Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador.
Fonte: Marques (2004).

A região I da Figura 3.16 corresponde ao modo de partida, e determina a velocidade mínima do vento necessária para que a turbina eólica entre em operação. Normalmente, as turbinas eólicas são projetadas para partirem com velocidades do vento entre 3-5 m/s. Na região II, ou região de operação normal, a turbina eólica pode operar em velocidade constante ou velocidade variável, dependendo do tipo de gerador e do sistema de controle utilizado. Na região III, ou região de limitação de potência, a potência de saída da turbina eólica é mantida em seu valor nominal, através de dispositivos de controle, de maneira a ser produzida a mesma potência para toda a faixa de velocidades do vento entre 12-25 m/s. Para velocidades acima de 25 m/s, aproximadamente, a turbina sai de operação a fim de serem evitados danos no equipamento e estrutura, sendo essa velocidade limite chamada de “velocidade de corte” (Marques, 2004).

3.5. Avaliação e Análise dos Dados de Ventos

Uma das primeiras etapas de qualquer projeto para geração de energia elétrica requer o levantamento da produção de energia elétrica futura, ou seja, determinar o potencial disponível. Por exemplo, em uma hidrelétrica, esse potencial é obtido através da quantidade de água que será armazenada. Nos sistemas eólicos, o potencial elétrico é calculado através da velocidade dos ventos. Essas informações possibilitam o correto dimensionamento do projeto e, principalmente, sua viabilidade econômica.

Para realizar estimativas satisfatórias de uma determinada região, faz-se necessária a avaliação dos dados de ventos. Poucos dados são coletados com o propósito de aproveitamento da energia eólica e muitas estações de medida estão localizadas perto de cidades, de maneira que essas informações sejam úteis apenas para aplicações meteorológicas, podendo apresentar discrepâncias para levantamentos de potenciais eólicos. Por isso, é de extrema importância realizar uma validação e análise dos dados obtidos antes de empregá-los em estimativas de potenciais eólicos.

Para o cálculo da produção estimada de eletricidade é necessário o uso de um histograma ou diagrama de frequências de ocorrência de velocidade do vento, gerado com dados previamente validados, decorrentes das medições realizadas. No histograma, os valores medidos de velocidade do vento são agrupados em intervalos de valores, denominados classes (Figura 3.17).

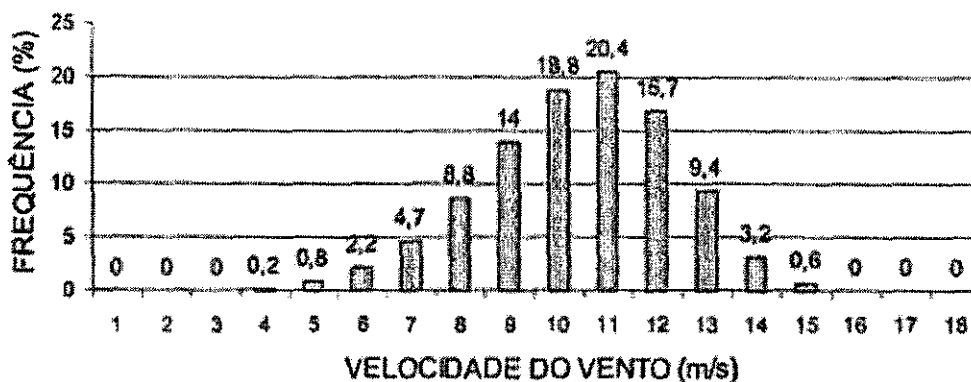


Figura 3.17 – Exemplo de distribuição estatística para dados de ventos.
Fonte: Carvalho (2003).

De posse da curva de potência (que fornece a potência gerada para cada velocidade do vento, como a curva da Figura 3.16) do gerador eólico a ser utilizado e da

distribuição estatística da velocidade do vento no local da instalação (histograma da Figura 3.17), a produção total de energia elétrica pode ser estimada através da equação (Gasch, 1996):

$$E_{\text{Total}} = \sum f_i P_i T \quad (3.15)$$

em que T representa o período total de tempo considerado na avaliação, P_i a potência fornecida pela curva de potência da instalação para a classe de velocidade do vento v_i , e f_i é a frequência de ocorrência da velocidade v_i , calculada por (Stevenson, 1981):

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (3.16)$$

onde t_i é o período de tempo no qual foi registrada a classe de velocidade do vento v_i .

O cálculo da produção de eletricidade de uma turbina eólica contemplará apenas as velocidades dos ventos de intersecção da distribuição de frequência e da curva de potencia da turbina. A partir da metodologia exposta, programas computacionais são utilizados para o cálculo da produção de eletricidade de uma turbina eólica em determinada região.

Outro aspecto importante é o período de medição da velocidade do vento: quanto maior o período, maior a confiança nas informações obtidas. Desta forma, através de longas séries de medições de alta qualidade, podem ser verificados importantes aspectos, como a variação sazonal e variação ano a ano da velocidade do vento. De modo geral, recomenda-se a medição de dados eólicos de um dado local por um período de no mínimo 1 ano. É importante salientar que quaisquer erros no levantamento do histograma de frequência da velocidade do vento, além de influenciarem negativamente a avaliação da produção de energia elétrica, irão se refletir na análise econômica do projeto, podendo significar inclusive o fracasso do empreendimento do ponto de vista do retorno do investimento realizado.

De acordo com a forma final assumida, o histograma da velocidade do vento pode ser aproximado através de uma função de distribuição de frequência (Gasch, 1996).

Uma das funções usadas pelo setor eólico é a denominada distribuição de frequência de Rayleigh, fornecida pela equação:

$$f_R = \frac{\pi}{2} \frac{v}{\bar{v}^2} e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2} \quad (3.17)$$

onde \bar{v} representa a velocidade média do vento, dada por:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (3.18)$$

Uma das vantagens desta distribuição é a necessidade de apenas um parâmetro para a definição da distribuição, possibilitando o uso em locais que tenham disponíveis apenas valores médios de velocidade do vento, e com isto permitindo a realização de prognósticos aproximados da produção futura de energia elétrica. Uma importante observação é que os cálculos referentes à produção de eletricidade que se encontram nos folhetos dos fabricantes de turbinas eólicas fundamentam-se comumente na hipótese de uma distribuição de Rayleigh para os ventos, pois esta se adapta bem ao regime de ventos europeu, continente onde se localiza a maior parte dos fabricantes. A Figura 3.18 mostra um histograma de frequência aproximado por uma distribuição de Rayleigh.

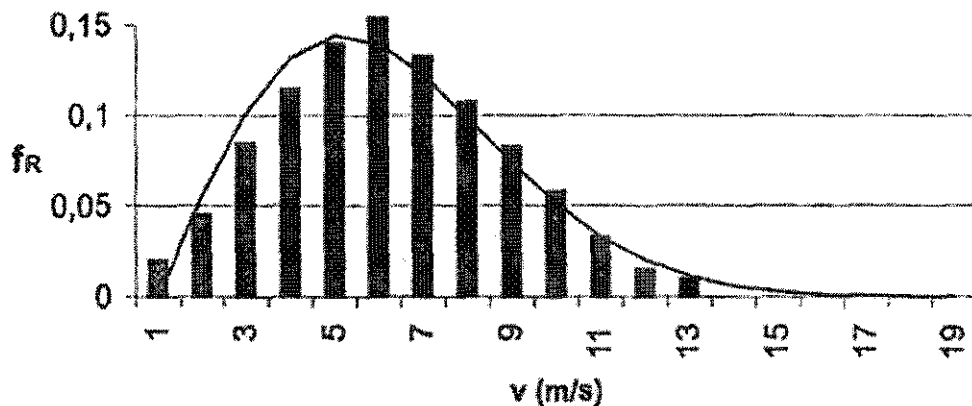


Figura 3.18 – Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh.
Fonte: Carvalho (2003).

Uma outra função bastante usada é a distribuição de Weibull, que constitui uma generalização da distribuição de Rayleigh e pode ser aplicada nos casos que não se ajustem à distribuição anterior (Carvalho, 2003).

A distribuição de Weibull é calculada através de:

$$f_w = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A} \right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{A} \right)^k} \quad (3.19)$$

onde k representa o fator de forma e A o fator de escala, parâmetros que definem a distribuição estatística e estão relacionados, respectivamente, à forma da curva e à velocidade média do vento.

As diversas formas que a distribuição de Weibull pode assumir para diferentes valores do fator de forma são mostradas na Figura 3.19. Para o caso específico de $k=2$ tem-se a distribuição de Rayleigh.

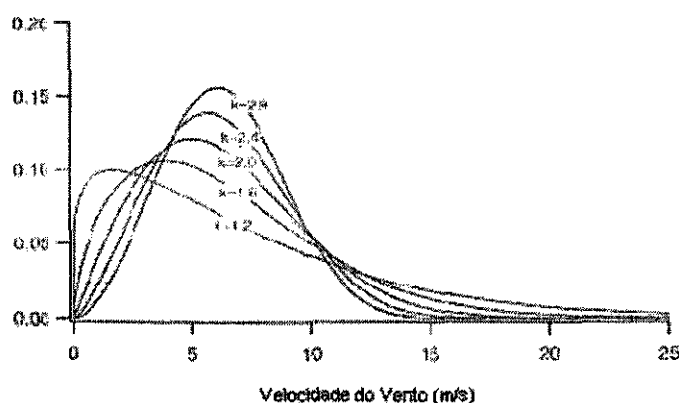


Figura 3.19 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.
Fonte: Manwell et al. (2002)

O fator de forma é inversamente proporcional às oscilações da velocidade do vento e, desta forma, está relacionado com a intensidade de turbulência definida por:

$$S = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (3.20)$$

onde σ representa o desvio padrão da velocidade do vento, dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v - \bar{v})^2 dt} \quad (3.21)$$

Desta forma, quanto menor a oscilação da velocidade, menor é o desvio padrão, menor é a intensidade de turbulência, maior é o fator de forma, e mais concentrado é o gráfico da distribuição de frequência.

3.6. Comprimento de Rugosidade

O comprimento de rugosidade, z_0 , corresponde à altura na qual a velocidade do vento é zero. Sendo conhecido seu valor, pode-se estimar a velocidade do vento em qualquer altura (equação 3.22) – nas primeiras dezenas de metros acima da superfície – a partir de valores de velocidade conhecidos (v_{ref}) para uma altura de referência (h_{ref}).

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (3.22)$$

Capítulo 4

METODOLOGIA

4.1. Projeto SONDA

O Projeto SONDA é constituído por uma rede de estações de coleta de dados solares, eólicos e climatológicos, distribuídas em diferentes regiões do Território Brasileiro (Figura 4.1). Essas estações são classificadas em quatro tipos diferentes, de acordo com sua instrumentação e tipo de dados coletados.

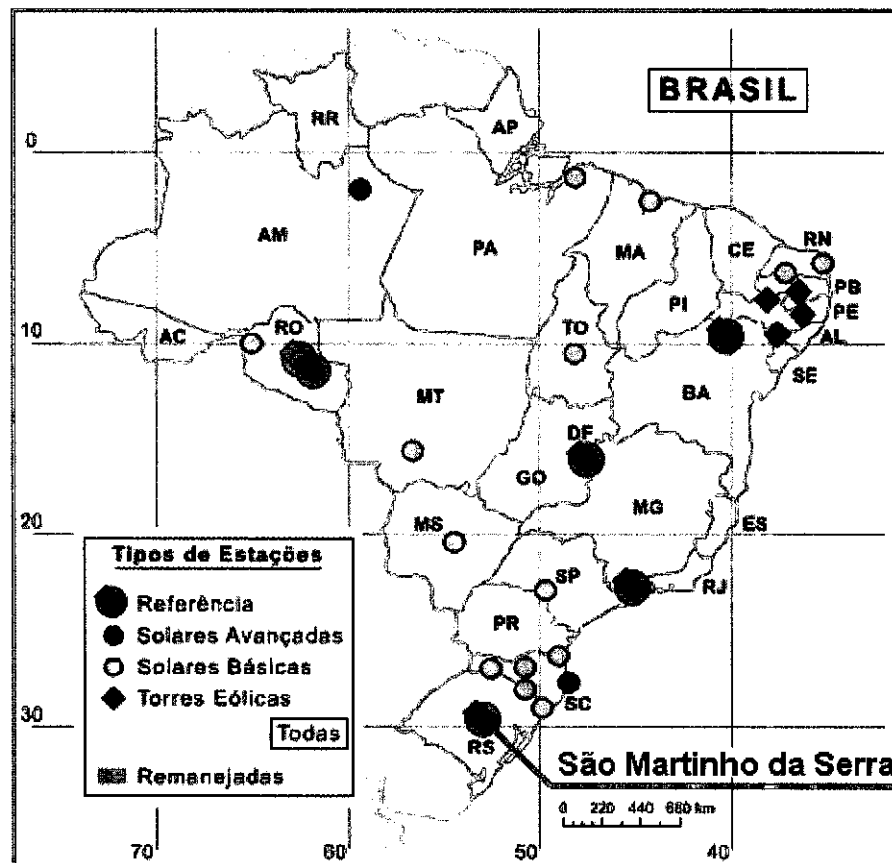


Figura 4.1 – Distribuição das estações SONDA no Território Nacional Brasileiro.
Fonte: SONDA (2006).

4.1.1. Estações de Referência

As estações de referência são as mais completas do Projeto SONDA. Estas possuem sensores solares, meteorológicos e eólicos, que realizam as seguintes medidas:

- Medidas Solares – radiação global horizontal, radiação direta normal, radiação difusa horizontal, radiação de onda longa descendente, radiação fotossinteticamente ativa (PAR), iluminância (Lux);
- Medidas Meteorológicas – temperatura, umidade relativa e pressão do ar atmosférico à superfície, e precipitação;
- Medidas Eólicas – velocidade e direção do vento nas alturas de 10, 25 e 50 metros a partir da superfície, e temperatura nas alturas de 25 e 50 metros.

4.1.2. Estações Solares

As estações solares avançadas são equipadas com sensores solares e meteorológicos.

- Medidas Solares – radiação global horizontal, radiação direta normal, radiação difusa horizontal, radiação de onda longa descendente, radiação fotossinteticamente ativa (PAR), iluminância (Lux);
- Medidas Meteorológicas temperatura, umidade relativa e pressão do ar atmosférico à superfície, e precipitação;
- Medidas Eólicas – velocidade e direção do vento a 10m de altura.

4.1.3. Estações Eólicas

As estações eólicas são equipadas apenas com torre eólica contendo sensores.

- Medidas Eólicas – velocidade e direção do vento nas alturas de 10, 25 e 50 metros a partir da superfície, e temperatura nas alturas de 25 e 50 metros.

4.2 Estação de Referência do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, RS

A Estação de Referência SMS (Latitude: 29°26'34"S, Longitude: 53°49'23"O), do Projeto SONDA, está instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, localizado no município de São Martinho da Serra, RS.

A Estação iniciou a coleta de dados em agosto de 2004. Os sensores solares foram instalados em uma plataforma com 3 metros de altura ao lado do Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul, juntamente com os equipamentos do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA) no âmbito da parceria: INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.

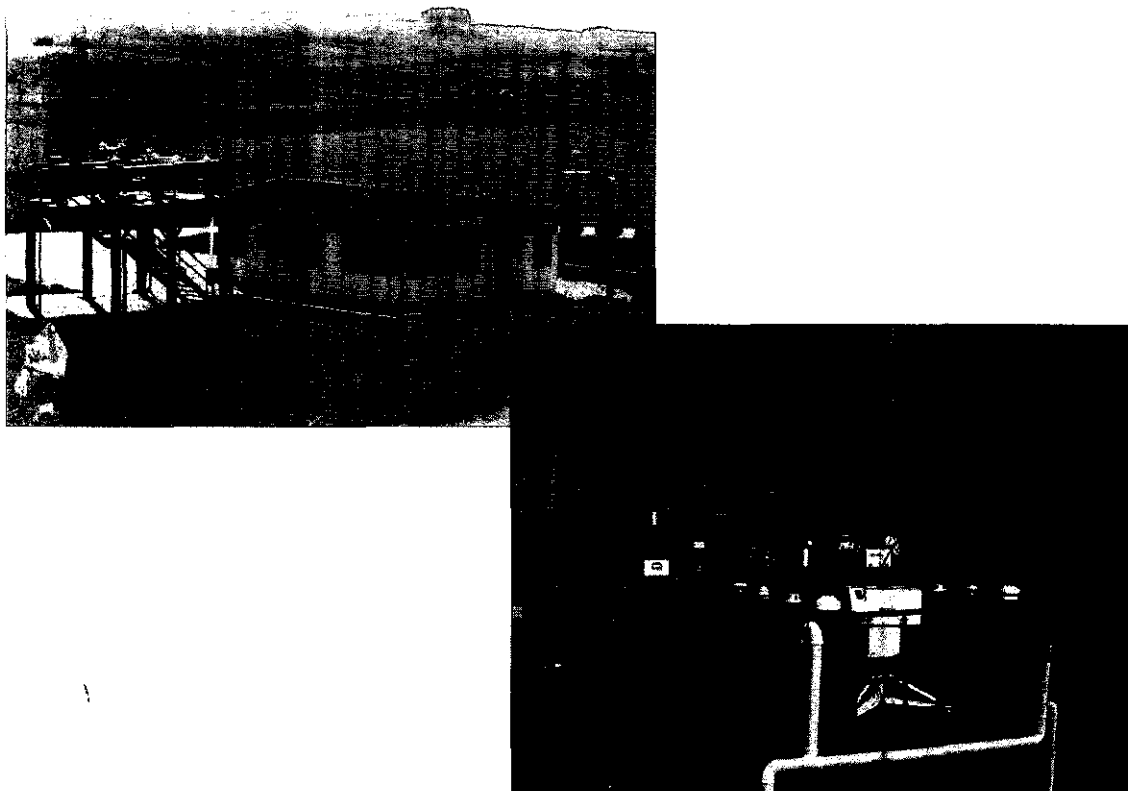


Figura 4.2 – Plataforma da Estação de Referência SONDA - SMS ao lado do Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul do Centro Regional de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE – MCT em São Martinho da Serra, RS

A Estação possui uma torre Anemométrica com 52 metros de altura, onde estão instalados os anemômetros e medidores de temperatura do ar. Os equipamentos da estação estão conectados a um Datalogger, situado no interior do prédio 1, que armazena os dados gerados pelos equipamentos, com resolução de 1 e 10 minutos.

A cada intervalo de 1 hora, o datalogger transfere os dados armazenados em sua memória para o PC SONDA (Prédio 1), atualizando o banco de dados. A manutenção imediata da Estação, assim como a conservação e atualização local do seu banco de dados, são responsabilidade da equipe do Laboratório Recursos de Energias Renováveis (LRER), do CRSPE/INPE – MCT.

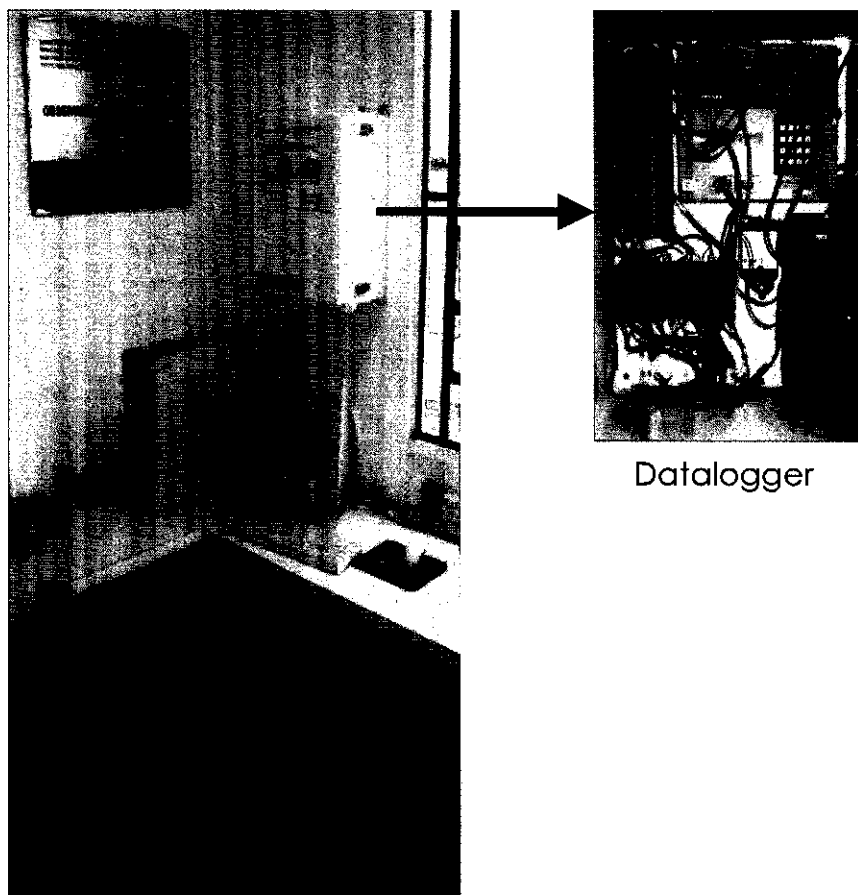


Figura 4.3 – Caixa do Datalogger junto ao computador SONDA no prédio 1 do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra.

Relatório Final de Atividades

Na figura 4.4, é apresentado o diagrama de configuração local dos equipamentos da estação.

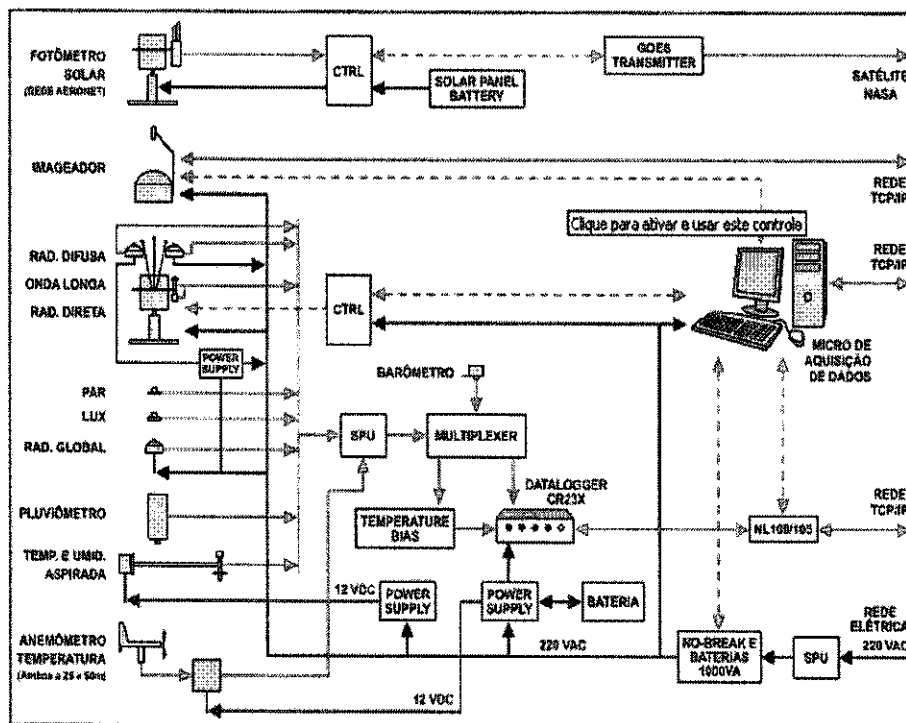


Figura 4.4 – Diagrama dos equipamentos da Estação SONDA - SMS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT. Fonte: SONDA (2006).

4.2.1. Torre Eólica

A torre eólica da Estação SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT está equipada com 3 anemômetros nas alturas de 10, 25, e 50 metros. Ainda, esta possui medidores de temperatura a 1 e 50 metros de altura.

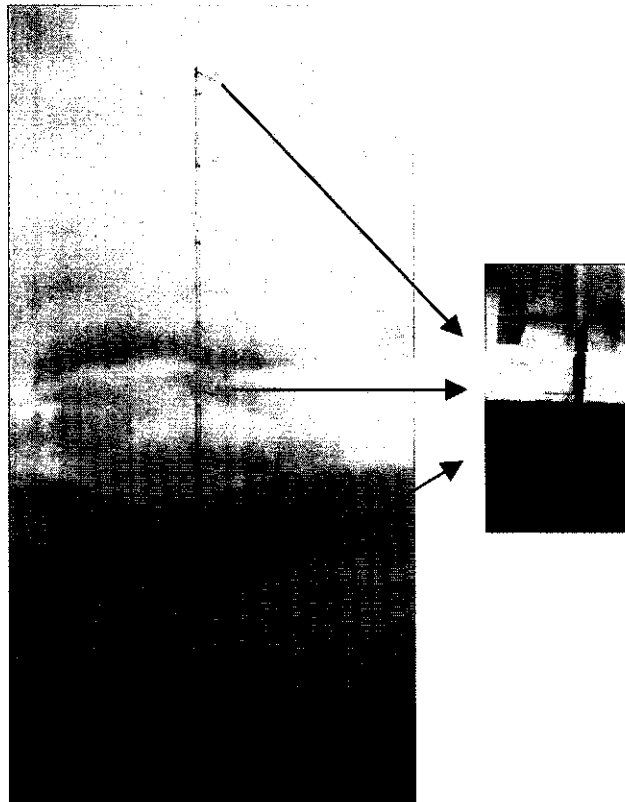


Figura 4.5 – Torre Eólica da Estação SMS com a posição dos três anemômetros no Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE - MCT.

4.2.2. Anemômetros

O Anemômetro Modelo 05106 – “*Wind Monitor-MA Model 05106*” – da “*R. M. Young Company*”, mede a velocidade horizontal e a direção do vento. Foi originalmente desenvolvido para utilização em bóias marítimas, sendo robusto e resistente à corrosão, porém leve e preciso. O corpo do sensor, a hélice e outras partes, são resistentes à radiação ultravioleta.

O sensor mede velocidade de vento de 0 a 60m/s, resistindo a rajadas de 100m/s. O sinal de saída é uma corrente elétrica alternada, senóide, com frequência proporcional à velocidade do vento. Este sinal AC é induzido por seis pólos magnéticos montados na haste da hélice. A cada revolução da hélice são produzidas três ondas senoidais completas.

O anemômetro (Figura 4.6) é instalado sobre uma haste vertical e move-se apontando sempre de frente para o vento. A direção do vento é determinada por um potenciômetro. Para uma voltagem constante de excitação aplicada ao potenciômetro, o sinal de saída é uma voltagem analógica diretamente proporcional ao ângulo azimutal.

Como mencionado anteriormente, a Estação SONDA - SMS do Observatório Espacial do Sul está equipada com três anemômetros, instalados na torre anemométrica de 52 metros de altura, produzindo dados de velocidade e direção dos ventos nas alturas de 10, 25 e 50 metros.

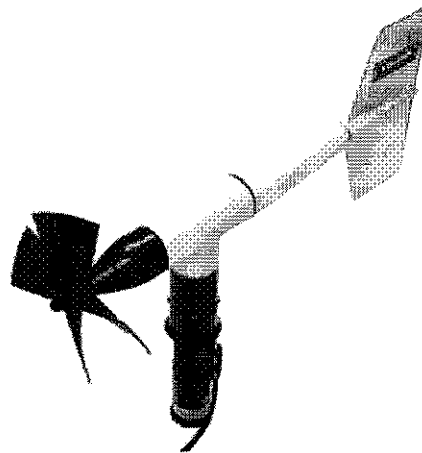


Figura 4.6 – Anemômetro *R. M. Young* modelo 05106. Fonte: Campbellsci (2006).

O “*Wind Line Driver Model 05631B*” é um acessório dos anemômetros da “*R. M. Young Company*”, e converte os sinais brutos de velocidade e direção do vento produzidos pelo anemômetro num sinal de corrente elétrica de 4 a 20 mA. Apesar de compor uma única placa, possui dois circuitos independentes: um para velocidade e outro para direção do vento (Figura 4.7).

Os circuitos são abrigados em um pequeno compartimento que é instalado junto ao anemômetro. Assim, o sinal que deixa o conjunto anemômetro/*line driver circuit* pode ser facilmente lido por um computador ou *datalogger*.

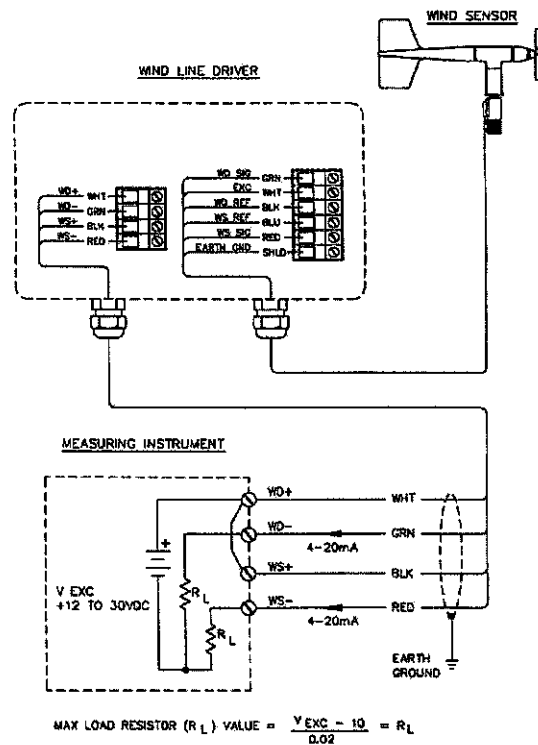


Figura 4.7 – Diagrama do “Wind Line Driver”. Fonte: Campbellsci (2006).

O equipamento é acoplado a uma haste, ficando afastado 2 metros da torre eólica (Figura 4.8). É fixado por meio de uma braçadeira.

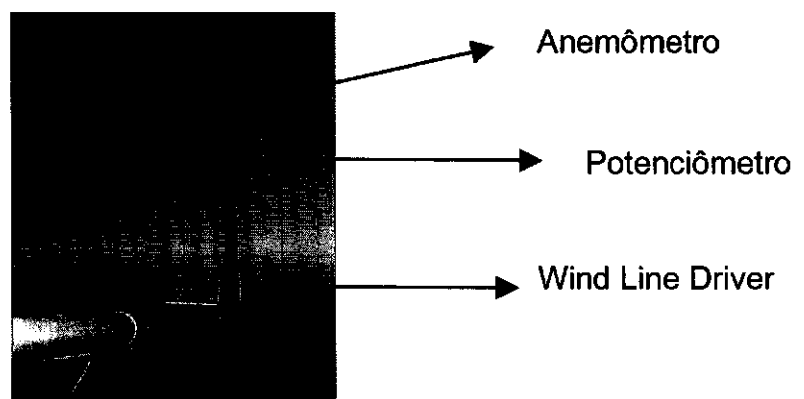


Figura 4.8 – Conjunto de medida de dados eólicos da Estação SONDA – SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT.

Relatório Final de Atividades

Diferentes estágios que compõem o anemômetro incluindo o potenciômetro, o qual gera os dados de direção dos ventos são apresentados na Figura 4.9.

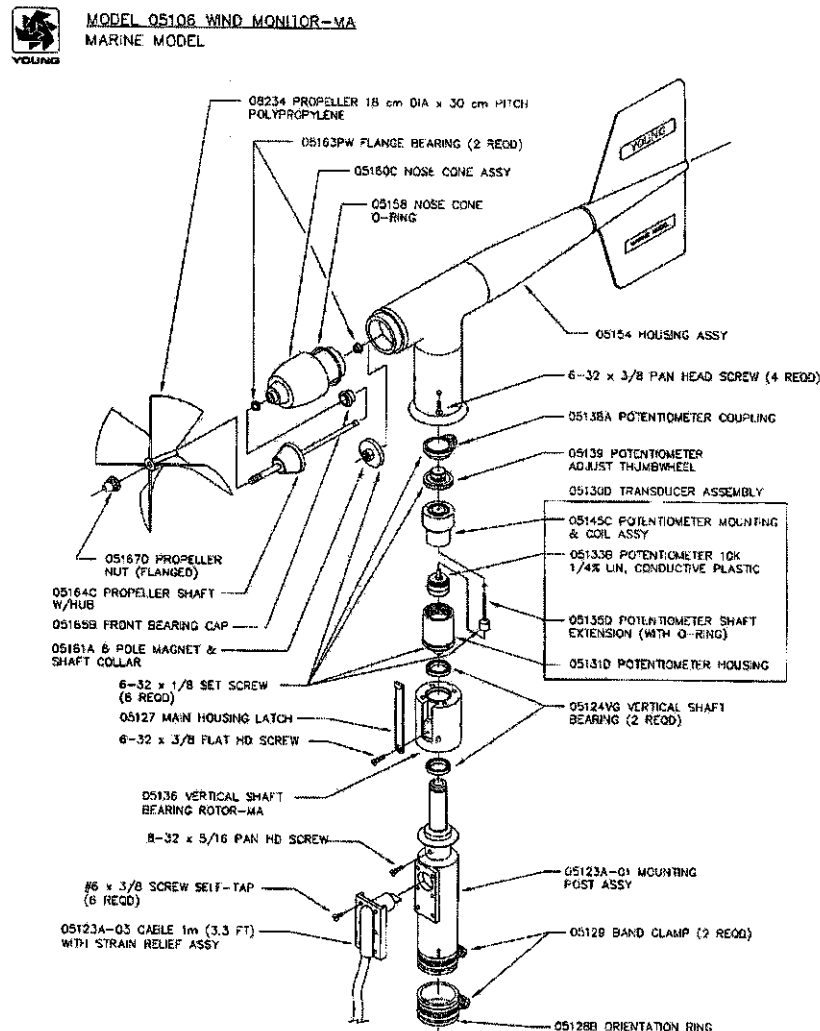


Figura 4.9 – Diagrama do sensor de medida de velocidade e direção de vento.
Fonte: Campbellsci (2006).

4.2.3. Outros equipamentos da Estação SMS.

Além dos equipamentos eólicos que estão relacionados diretamente ao projeto do bolsista, existem outros que compõem a Estação de São Martinho da Serra, RS:

- Total Sky Imager: aparelho composto por uma câmera colorida para imageamento do céu. As imagens são processadas por um programa que avalia a fração do céu coberta por nuvens.

- Piranômetros CM 21 e CM 22: medem a radiação solar global e difusa, respectivamente.
- Sensores PAR Lite e LUX Lite: medem a radiação solar fotossinteticamente ativa e a luminosidade.
- Pireliômetro: mede a radiação solar direta.
- Pirgeometro: mede radiação de onda longa descendente, emitida pela atmosfera.

Os demais equipamentos realizam medidas climatológicas, tais como temperatura, umidade e pressão.

4.3. Análise dos Dados

As análises dos dados dos ventos são realizadas a fim de caracterizar o regime de ventos de uma determinada região. Podem ser analisadas as seguintes variabilidades temporais:

- Variabilidade Anual: para se obter um bom conhecimento do regime dos ventos não é suficiente basear-se na análise de dados de vento de apenas um ano, uma vez que podem haver flutuações climáticas de ano para ano. O ideal é dispor de dados referentes a vários anos. À medida que uma maior quantidade de dados anuais é coletada, as características levantadas do regime local dos ventos tornam-se mais confiáveis e evita-se tomar como comportamento geral, o comportamento observado em um ano de situação climática crítica.
- Variabilidade Sazonal: a potência varia com uma relação cúbica da velocidade, por isso analisar períodos menores, como os períodos das estações do ano ou períodos mensais, possui grande utilidade para evitar que os resultados se afastem muito da realidade ao longo do ano. Além disso, esse estudo é necessário para avaliação da complementaridade entre a energia eólica e outras fontes renováveis disponíveis.
- Variabilidade Diária: a análise diária é necessária no dimensionamento do sistema eólico, permitindo verificar a velocidade média de cada hora e

encontrar os picos de geração, relacionando-os com a média de carga de consumo exigida em determinada hora do dia.

- **Variações de Curta Duração:** são associadas às flutuações e às turbulências do vento que podem afetar a integridade estrutural do sistema eólico. Rajadas de ventos, caracterizadas por aumento brusco da velocidade e mudança de direção causam danos ao sistema eólico, e são mascaradas pela utilização de médias de intervalos de tempo maiores.

Através das análises estatísticas dos dados de velocidade e direção utilizando rotinas em MATLAB[®] se obtêm as distribuições estatísticas de Weibull para as velocidades e a distribuição percentual das direções do vento, para um determinado local. Essa ferramenta computacional permite realizar análises para todas as variabilidades temporais, pois possui funções matemáticas para validação e análises de conjuntos de dados eólicos com diferentes resoluções temporais.

4.4. Avaliação do Potencial de uma Região

Após validação e análise dos dados de ventos para uma determinada região, será verificado o potencial eólico da região. Para essa tarefa, foi escolhido o software WAsP[®] - Wind Atlas Analysis and Application Program. Amplamente utilizado nos estudos meteorológicos e pela indústria eólica, o WAsP[®] é um software que permite realizar inúmeros estudos (análises) tanto para ventos horizontais quanto para os deslocamentos verticais de ar. O programa utiliza dados climatológicos de uma ou mais estações próximas e permite o cálculo do vento médio e sua variabilidade anual, no local candidato a suportar um gerador eólico.

Seu funcionamento segue a seguinte metodologia:

Análise:

- Dados de Direção e Vento → Ventos Observados (vento na superfície)
- Ventos Observados + Características do Local → Ventos Locais (vento geostrófico)

Aplicação:

- Ventos Locais + Características do Local → Produção Estimada de Energia

Capítulo 5

ATIVIDADES DOS BOLSISTAS

5.1. Revisão Bibliográfica

Os bolsistas realizaram ao longo do período do Projeto a leitura de diferentes bibliografias referentes à pesquisa e aplicação de energias renováveis, com maior ênfase em energia eólica. Foram consultadas referências de Meteorologia, materiais técnicos sobre sensores meteorológicos, aerogeradores e modelagem de ventos, e artigos sobre vento, potencial eólico e iniciativas internacionais no setor. Além de livros e artigos, o bolsista buscou informações na internet.

5.2. Operação dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS

5.2.1. Manutenção dos equipamentos SONDA

Os bolsistas realizaram visitas periódicas ao Observatório Espacial do Sul para manutenção dos equipamentos. Esta atividade é de grande importância, pois contribui para a conservação física dos aparelhos, como também para obtenção de dados com boa confiabilidade.

5.2.3. Troca de Sílica Gel

Os medidores de radiação da estação, como qualquer equipamento eletrônico, são vulneráveis à umidade, e em função disso, faz-se necessária a conservação da baixa umidade em seu interior. Para isso, os medidores possuem um dissecador em seu interior, contendo Sílica Gel, a qual deve ser trocada periodicamente. É possível identificar quando a umidade está elevada, através da coloração da sílica. Quando esta apresentar uma coloração rosada, significa que a quantidade de umidade retida está elevada. Deve-se pois, substituir a sílica úmida por sílica seca (de coloração azul).

5.2.3. Limpeza e polimento

A limpeza dos domos de quartzo dos medidores de radiação da estação SONDA é necessária para médias confiáveis de radiação, uma vez que a presença de sujeira ocasiona absorção de radiação na superfície do domo, e medida de um valor de radiação inferior ao real, pelo sensor .

Ainda, outro equipamento que necessita de limpeza é o imageador de nuvens. Esse equipamento faz imagens do céu a cada 15 minutos fornecendo a porcentagem de nuvens no céu. O imageador é composto de uma câmera CCD e de uma calota espelhada, a qual deve ser limpa, encerada e polida periodicamente.

5.2.4. Instalação do Anemômetro de 10 metros

No mês de maio de 2006, esteve em visita técnica ao Observatório Espacial do Sul, o Eng. Ricardo Guarnieri. Nesse período, foi instalado o anemômetro de 10 metros na torre eólica que compõe a Estação SONDA – SMS do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra. Na ocasião, o bolsista, o visitante e seus colegas, realizaram um estudo das especificações de montagem e instalação do equipamento. O diagrama geral de instalações elétricas e da estação foi estudado visando não apenas a ligação do cabo de dados do anemômetro (ligando a torre ao prédio onde fica o datalogger), como também instalar o novo ventilador no sistema de medida aspirada de temperatura e umidade do ar (que havia apresentado um defeito) e a verificar as causas de erros em leituras de temperatura.

Ao ser sido finalizada a passagem do cabo e montagem do anemômetro no suporte de 10 metros da torre, o bolsista realizou as instalações internas dos contatos do cabo no datalogger. Em seguida, o datalogger começou a registrar dados coerentes de velocidade e direção dos ventos a 10 metros.

Ainda, nessa mesma visita, foram verificadas as resistências elétricas nas instalações dos piranômetros e pireliômetro, que vinham apresentando erro nas medidas de suas temperaturas internas. O problema foi solucionado ao ser constatado que os circuitos de temperatura dos sensores estavam ligados a uma porta de excitação do datalogger que não estava ativada, não fornecendo a tensão elétrica necessária.

5.4. Realização de um perfil do potencial energético eólico da região central do Rio Grande do Sul

Durante o Projeto iniciou-se um levantamento do potencial eólico da região central do Estado do Rio Grande do Sul, com a determinação do relevo do terreno, comprimento de rugosidade, velocidades médias para um ano específico, velocidades médias sazonais e para cada direção do vento.

É importante salientar que não é coerente chegar a uma conclusão final do perfil eólico de uma região sem antes possuir um banco de dados suficiente para isso. Portanto, os resultados obtidos são de caráter preliminar e necessitam de uma continuidade para que se possa chegar a conclusões mais seguras. Apesar disso, as análises inicialmente feitas para este período inicial de dois anos foram satisfatórias.

5.5. Visita Técnica ao CPTEC – INPE

Os alunos do Laboratório de Recursos e Energias Renováveis – LRER realizaram uma visita técnica a sede do INPE/MCT, em São José dos Campos, SP a fim de conhecer suas instalações e possibilitar uma maior integração com grupo de pesquisa do Projeto SONDA. Esta atividade ocorreu durante a segunda semana de fevereiro deste ano.

Dentro do cronograma realizado durante esse período, os alunos visitaram as instalações do INPE/MCT em São José dos Campos, SP e viajaram até Cachoeira Paulista -SP, juntamente com o Orientador do Projeto, Dr. Enio Bueno Pereira, que apresentou as instalações do CPTEC/INPE - MCT. Também conheceram o LIM – Laboratório de Instrumentação e Calibração Meteorológica – onde são feitas as manutenções e calibrações dos equipamentos que compõem a Rede SONDA e demais equipamentos meteorológicos.

5.5.1 – Palestras Técnicas da Equipe do Grupo de Pesquisa em Energia e Recursos Renováveis

Os membros do Grupo de Pesquisa em Energia e Recursos Renováveis, da Divisão de Clima e Meio Ambiente - DMA do CPTEC/INPE - MCT, apresentaram



palestras técnicas para os alunos do LRER/CRSPE/INPE - MCT, onde foram descritas todas as atividades que estão sendo desenvolvidas, proporcionando uma visão mais ampla do Projeto. As palestras foram abertas pelo Dr. Enio Bueno Pereira, que no cargo de Líder do Grupo, deu as boas-vindas aos alunos, esclarecendo dúvidas e expondo os planos para atividades futuras a serem realizadas na parceria com o LRER/CRSPE/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

5.5.2 – Treinamento para Uso do Software WAsP

O Dr. Fernando Ramos Martins, Pesquisador do Projeto SONDA, ministrou um curso de treinamento para o uso e aplicação do WAsP. Foram definidas metas a serem desenvolvidas pelo bolsista, no Estado do Rio Grande do Sul, fazendo uso desse software.

5.6. Participação em eventos de IC e publicações dos bolsistas

Ao longo do período da bolsa, os bolsistas participou de inúmeros eventos com apresentação de trabalhos:

“THE SONDA PROJECT STATION IN THE INPE’s SOUTHERN SPACE OBSERVATORY IN SOUTH BRAZIL”.

Evento: II Deutsch – Brazilianisches Symposium, Santa Maria, Brazil, 12 – 15 September 2005.

Autores: Jefferson G. Rosetto, Leonardo A. Biasi, **Marcelo P. Pes**, Marcus Guedes, Ricardo A. Guarnieri, Enio B. Pereira, Sylvio Mantelli, Nelson J. Schuch.

“ANÁLISE DA VELOCIDADE MÉDIA DOS VENTOS NA REGIÃO DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL: ESTUDO PRELIMINAR”.

Evento: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Autores: **Marcelo P. Pes**, Leonardo A. Biazzi, Marcus Guedes, Sylvio L. Mantelli Neto, Ricardo A. Guarnieri, Enio B. Pereira, Nelson J. Schuch.

“COMPORTAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR NO PERÍODO DE AGOSTO/2004 A MARÇO/2005 NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL”.

Evento: 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Autores: Marcus Guedes, **Marcelo P. Pes**, Leonardo A. Biazi, Ricardo A. Guarnieri, Sylvio L. Mantelli Neto, Enio B. Pereira, Nelson J. Schuch.

“DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS VENTOS NA REGIÃO DE SÃO MARTINHO DA SERRA POR MEIO DA FUNÇÃO DE WEIBULL:DADOS DE AGOSTO/2004 A JULHO/2005”.

Evento: IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria, RS, 14 – 16 de Dezembro 2005 – Sessão Técnica – Análise de Dados Turbulentos.

Autores: **Pes, M.P.**; Guedes, M.; Rosetto, J.G.; Biazi, L.A.; Guarnieri, R.A.; Martins, F.R.; Pereira, E.B.; Schuch, N.J.

“CORRELAÇÕES ENTRE UMIDADE RELATIVA, NEBULOSIDADE E IRRADIÂNCIA SOLAR NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL”.

Evento: IV Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria, RS, 14 – 16 de Dezembro 2005 – Sessão Técnica – Estudos Observacionais.

Autores: Guedes, **Pes, M. P.**; Biazi, L. A.; Rosetto, J. G.; Martins, F. R.; Guarnieri, R. A.; Pereira, E. P.; Schuch, N. J.

“SISTEMA DE FUNCIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS PAR LITE E LUX LITE DO PROJETO SONDA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL”.

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada – Santa Maria – Março de 2005.

Autores: Jefferson G. Rosetto, **Marcelo P. Pes**, Leonardo A. Biazi, Marcus Guedes, Ricardo A. Guarnieri, Enio Pereira, Sylvio Mantelli, Nelson J. Schuch.

Os bolsistas realizaram a substituição do aspirador do medidor de temperatura e umidade do ar que estava queimado. Assim, a partir do mês de maio, a estação passou a contar com dados de ventos a 10 metros e os dados de temperatura e umidade passaram a ser novamente confiáveis para utilização.

5.3. Dados

5.3.1. Coleta de dados

Os dados da Estação SONDA - SMS são armazenados em um datalogger, localizado no prédio 1 do Observatório Espacial do Sul – OES/CRSPE/INPE – MCT. Esses dados são copiados e salvos no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis (no Prédio Sede do CRSPE/INPE - MCT no “campus” José Mariano da Rocha Filho da UFSM, em Santa Maria), através da internet. Os dados do Imageador de nuvens – que representam um maior volume de dados – são armazenados no microcomputador existente no Prédio 1, e nas ocasiões de visitas de manutenção, precisam ser copiados em dispositivos USB de memória Flash ou em CDs, sendo posteriormente salvos no microcomputador do Laboratório. Através da internet, o servidor SONDA, localizado no CPTEC, em Cachoeira Paulista, SP, conecta-se ao computador do Prédio 1 do OES/CRSPE/INPE - MCT e coleta os dados da Estação, adicionando-os ao banco de dados da rede nacional.

5.3.2. Redução e análise de dados

Após coletados e salvos, os dados estão prontos e a disposição para serem manipulados. Os softwares usados para redução e análise são Excel, Origin e MATLAB[®]. Os dados reduzidos são separados por períodos e categoria, ou seja, dados de radiação, eólicos ou climatológicos.

Os dados reduzidos são separados em mês ou ano. Ainda, há um cuidado especial em manter inalterado o banco de dados original ou “dado bruto”. Algumas comparações entre os equipamentos são feitas normalmente para verificar se há coerência entre nos dados gerados por eles.



“CÁLCULO DO COMPRIMENTO DE RUGOSIDADE PARA FINS EÓLICOS DA REGIÃO DE SÃO MARTINHO DA SERRA: DADOS DE AGOSTO DE 2004 A JULHO DE 2005”.

Evento: XX Jornada Acadêmica Integrada – Santa Maria – Março de 2005.

Autores: **Marcelo P. Pes**, Marcus Guedes, Jefferson G. Rosetto, Leonardo A. Biazi, Ricardo A. Guarnireri, Fernando R. Martins, Enio B. Pereira, Nelson J. Schuch.

“ANÁLISE DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA DA ESTAÇÃO SONDA DE SÃO MARTINHO DA SERRA, RS, BRASIL (29,4°S; 53,8°O)”

Evento: I Encontro Sul – Brasileiro de Meteorologia e II Jornada de Palestras dos Estudantes de Meteorologia – UFPEL – Pelotas – 05-09 de junho de 2006.

Autores: Marcus Guedes, Daniel V. Fiorin, **Marcelo P. Pes**, **Rafael F. Bertagnolli**, Ricardo A. Guarnieri, Fernando R. Martins, Enio B. Pereira, Nelson J. Schuch.

Capítulo 6

RESULTADOS OBTIDOS

A partir dos dados de ventos obtidos, foi feito um estudo das características dos ventos para a Região Central do Rio Grande do Sul.

6.1. Análise da distribuição e velocidade dos ventos a 25 e 50 metros.

Da avaliação dos dados, obtidos no Observatório Espacial do Sul, constatou-se, de forma preliminar, que as direções predominantes dos ventos para 25 e 50 metros foram vento de Nordeste e vento de Sudeste, correspondendo a 45 % das direções dos ventos incidentes na região.

Dentre as velocidades médias calculadas para cada sentido dos ventos, ao longo de 1 ano, observa-se que os maiores valores encontrados para a altura de 50 metros foram 7,7 m/s no sentido Nordeste (NE) e 7,1 m/s no sentido Leste (E). Para 25 metros, os maiores valores de velocidades médias foram 5,9 m/s (NE) e 5,7 m/s (E), respectivamente.

A direção predominante dos ventos é apresentada nos gráficos da Figura 6.1 para 25 e 50 metros de altura, respectivamente.

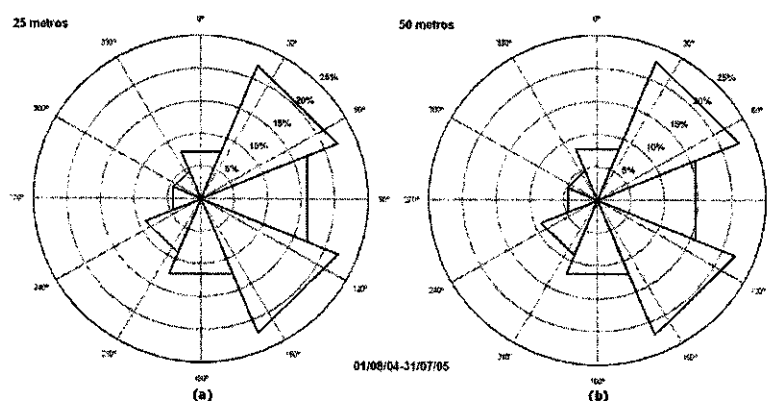


Figura 6.1 – Sentidos predominantes das direções dos ventos a 25 metros (a) e 50 metros (b) de altura, observados no Observatório Espacial do Sul.

O Norte geográfico é determinado pela posição 0° do sistema de coordenadas, sendo o Leste equivalente a 90° . Observa-se bastante semelhança nas frequências de ocorrência das direções do vento entre as duas alturas de medida.

6.2. Emprego da função de distribuição de frequências de Weibull

A função de Weibull (Equação 3.19) é amplamente utilizada pelo Setor Eólico, possibilitando a realização de prognósticos aproximados da produção futura de energia elétrica.

A partir dos dados de velocidade de vento para o período de estudo, foram calculados os fatores de forma, k , e escala, A , da distribuição de Weibull, para cada altura de medida. Utilizando estes fatores na Equação 3.19, obteve-se as curvas apresentadas nas Figuras 6.2 e 6.3.

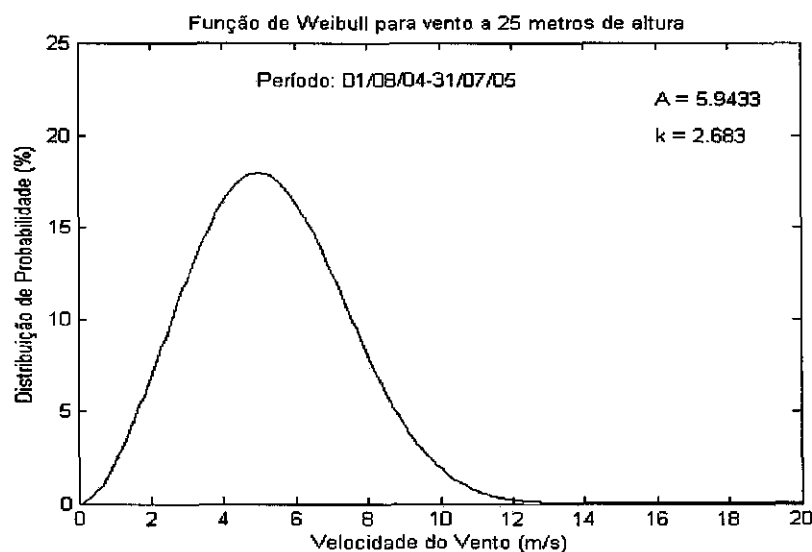


Figura 6.2 – Distribuição de Weibull para altura de 25 metros

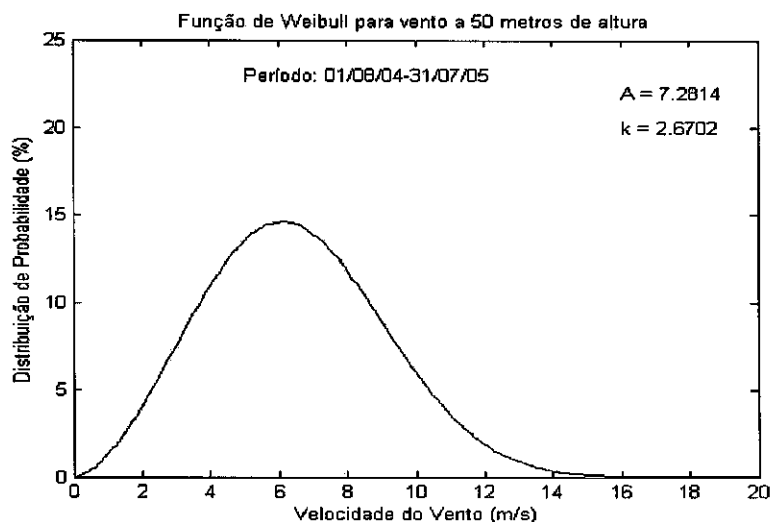


Figura 6.3 – Distribuição de Weibull para altura de 50 metros

De acordo com as Figuras 6.3 e 6.4, a velocidade do vento com maior probabilidade de ocorrência, considerando o período de 1 ano de dados, é de aproximadamente 5 m/s a 25 metros e 6 m/s a 50 metros.

Para o fator de forma, k , foram obtidos valores de 2,68 e 2,67, para as alturas de 25 e 50 metros, respectivamente. Apesar da proximidade entre os valores de k , o fator de escala, A , diferiu consideravelmente, assumindo valores de 5,94 e 7,28 para 25 e 50 metros respectivamente. O maior valor de A , para 50 metros, indicam probabilidades maiores de ocorrência de velocidades de vento mais elevadas em 50 metros, o que resulta em uma distribuição menos concentrada, em relação à distribuição de velocidades em 25 metros.

6.3. Determinação do comprimento de rugosidade do terreno

Na análise realizada, utilizando-se as velocidades médias ao longo do período de 1 ano nos dois níveis de observação, verificou-se um comprimento de rugosidade de aproximadamente 0,05 metros.

A região possui características de pradaria e campo que, de acordo com a literatura, possuem comprimento de rugosidade de 0,01 metros. A diferença entre o



Relatório Final de Atividades

valor calculado e o valor encontrado na literatura, pode ser explicada por peculiaridades do terreno, como a presença de construções próximas.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

Da avaliação dos dados obtidos pelos anemômetros instalados e em operação no Observatório Espacial do Sul do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – OES/CRSPE/INPE - MCT, constatou-se, de forma preliminar, que as direções predominantes dos ventos para 25 e 50 metros foram vento de Nordeste e vento de Sudeste, com valores de velocidades médias superiores a 5 m/s, para o período compreendido entre agosto de 2004 e maio de 2006.

Pode-se determinar um perfil inicial das características do relevo da região, tendo sido calculado, para o período de um ano, o comprimento de rugosidade do terreno.

Ainda, durante o período de vigência da Bolsa de Iniciação Científica do Programa: PIBIC/INPE – CNPq/MCT no CRSPE/INPE – MCT, os bolsistas realizaram atividades de revisão bibliográfica, que permitiram consolidar a base teórica necessária para grande parte das atividades desenvolvidas. Essas atividades foram focalizadas na realização de estudos e análises dos dados eólicos obtidos pelos equipamentos do Projeto SONDA.

O bolsista atuou na manutenção semanal dos equipamentos da Estação SONDA – SMS, em operação no Observatório Espacial do Sul, bem como na instalação do terceiro anemômetro da torre eólica, localizado a 10 metros de altura. As atividades de manutenção permitem o correto funcionamento dos equipamentos lá instalados.

O conhecimento agregado durante o período de bolsa, permitiu aos bolsistas participarem de eventos de Iniciação Científica, importantes para divulgar e adquirir novos conhecimentos do assunto.

O conjunto de atividades realizadas no decorrer do período de bolsa têm permitido uma vivência prática e científica dos conhecimentos teóricos adquiridos no curso superior. Essas experiências são importantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros e atividades relacionadas a estudos eólicos, voltados ao setor energético, e



possibilitam aos bolsistas a oportunidade de tornarem-se profissionais capazes de atuarem no meio científico e tecnológico de nosso País.

Capítulo 8

ATIVIDADES FUTURAS

As atividades concluídas, neste primeiro ano de Iniciação Científica e Tecnológica, constituíram uma fase preliminar, que guiará as etapas subsequentes deste Projeto. Para tal, existe a necessidade de prosseguimento dos estudos dos ventos da região a fim de se chegar ao principal objetivo proposto: avaliar o potencial dos ventos na região central do estado do Rio Grande do Sul. Sendo assim, as seguintes atividades constituirão a próxima etapa desse Projeto:

- Avaliação de um maior conjunto de dados de vento através da distribuição de Weibull, bem como determinar as velocidade médias e direções predominantes em várias escalas temporais, e verificar os períodos diários de maior intensidade;
- Realizar uma comparação dos resultados obtidos com o atual Atlas Eólico Brasileiro e do Estado do Rio Grande do Sul;
- Avaliação do perfil vertical do vento e relações com rugosidade e obstáculos do local, bem como estudo do sítio, empregando o software WAsP;
- Caracterização do potencial energético eólico da região central do Rio Grande do Sul;

Referências Bibliográficas

- CARVALHO, P. **Geração Eólica**. Fortaleza, Imprensa Universitária, 146p. 2003.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained – Theory, Design and Application**. New York, John Willey & Sons, 577p. 2002.
- SONDA, Sistema Nacional de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estações do Projeto SONDA. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/sonda/>>. Acessado em 10 jun 2006.
- LUTGENS, Frederick K.; TARBUCK, Edward J. **The Atmosphere: an introduction to Meteorology**. Sixth Edition. New Jersey, Prentice Hall, Inc., 462p. 1995.
- MARQUES, Jeferson. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 132p. 2004.
- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sergio de Salvo Brito. **Energia Eólica – Princípios e Aplicações**. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.pdf>. Acessado em 5 abr. 2006.
- GRIMM, A. M. **Meteorologia Básica – Notas de Aula**. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/drimm/aposmeteo/>>. Acessado em 15 jun. 2006.
- MME – Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2004 (BEN-2004)**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>.
- IEA – International Energy Agency. Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acessado em 5 jun. 2006.
- LI, M.; LI, X. **MEP - Type distribution function: a better alternative to Weibull function for wind speed distributions**. *Renewable Energy*. 30: 1221–1240, 2005.
- Wind Force 12: A Blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2020**. EWEA.
- GASCH, R. **Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf**. B. G. Teubner, 1996.
- STEVENSON, W. J. **Estatística Aplicada à administração**. Harper & Row do Brasil, 1981.
- Hansen, M.O.L **Basic Rotor Aerodynamics applied to Wind Turbines**. Dept. of Energy Engineering Fluid Mechanics, Technical University of Denmark, 1998.

Relatório Final de Atividades

GASCH, R.; TWELE, J. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Solarpraxis AG, 2002.

PORTO, Cristina. **Energias Renováveis**. Informe Técnico. Rio de Janeiro: CRESESB, n. 9, 2004. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/Publicacoes/download/Info9_pag4-5.pdf>. Acesso em 1 jun. 2006.

ENEL. Disponível em: <<http://www.enel.it/VisitaCentraliHtml/VisitaCentralihtml/eolica/Eolica.asp>>. Acesso em 13 jun. 2006.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Agroenergia 2006 – 2011**. Brasília. 2005.

Campbellsci. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com>>. Acesso em 15 jun. 2006.

Rincondelvago. Disponível em: <<http://html.rincondelvago.com/pitot.html>>. Acesso em 15 jun 2006

SEMC - Secretaria de Energia, Minas e Comunicações. Disponível em: <<http://www.semc.rs.gov.br>>. Acesso em 1 jun. 2006.

Geller, H. S. **Revolução Energética: políticas para um futuro sustentável**, Rio de Janeiro, Relume Dumará, 299p., 2003.

Jackson, P. S., Hunt, J. C. R. *Turbulent wind flow over a low hill*. **Quart. J. R. Met. Soc.**, v.101, p. 929-955, 1975.

Bentley, R.W., Global Oil and Gas Depletion: An Overview, **Energy Policy**. v. 30, p.189-205, 2002.

VIDAL, José. Entrevista - Conselho em Revista. CREA-RS. Porto Alegre: n. 22, p.6-7, 2006.

NWTC – National Wind Technology Center. **Wind Resource Information**. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/wind/animation.html#animation>>. Acesso em 20 jun. 2006.