



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 102361/2006-1

Diogo Alessandro Arsego (UFSM, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT,
Março de 2007 - Julho de 2007)
E-mail: diogo@lacesm.ufsm.br

Rafael Fettermann Bertagnolli (UFSM, Agosto de 2006 - Fevereiro de 2007)
E-mail: rafaelb@lacesm.ufsm.br

Dr. Enio Bueno Pereira (Orientador, CPTEC/INPE – MCT)
E-mail: eniobp@cptec.inpe.br

Dr. Nelson Jorge Schuch (Co-Orientador, CRS/CIE/INPE – MCT)
E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br

Santa Maria, Julho de 2007.



Dados de Identificação

Bolsistas:

Diogo Alessandro Arsego, Bolsista, período de 03/2007 a 07/2007

Acadêmico do Curso de Meteorologia

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

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Rafael Fettermann Bertagnolli, Bolsista substituído, período de 08/2006 a 02/2007

Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica

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

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Processo CNPq: **102361/2006-1**

Orientador:

Dr. Enio Bueno Pereira

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – DMA/CPTEC/INPE – MCT.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT.

Co-Orientador:

Dr. Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CIE/INPE – MCT.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – 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 – CRS/CIE/INPE – MCT

Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – CRS/CIE/INPE – MCT

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT

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

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





Diretório dos Grupos de Pesquisa no Brasil



[Estudantes](#) [Página Inicial](#)

Grupo(s) de que participa

Nome do grupo	Nome do líder	Status	Instituição	Data de envio
Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis	Nelson Jorge Schuch	Aguardando certificação	INPE	18/06/2007

Notas:

- Apenas os grupos certificados podem fazer parte das bases censitárias;
- Pesquisadores ou estudantes sem currículo Lattes, mesmo sendo integrantes de grupos certificados, não são visualizados na busca textual da base corrente e não são incluídos nas bases censitárias.



Grupo de Pesquisa
Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis



[Identificação](#)

[Recursos Humanos](#)

[Linhas de Pesquisa](#)

[Indicadores do Grupo](#)

Identificação

Dados básicos

Nome do grupo: Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis

Status do grupo: **aguardando certificação pela instituição**

Ano de formação: 1992

Data da última atualização: 18/06/2007 15:58

Líder(es) do grupo: Nelson Jorge Schuch - nelson.schuch@pq.cnpq.br

Damaris Kirsch Pinheiro - damaris@lacesm.ufsm.br

Área predominante: Ciências Exatas e da Terra; Geociências

Instituição: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

órgão: Coordenação de Gestão Científica - CIE

Unidade: Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS

Endereço

Logradouro: Caixa Postal 5021

Bairro: Camobi

Cidade: Santa Maria

Telefone: 33012026

E-mail: nischuch@lacesm.ufsm.br

CEP: 97110970

UF: RS

Fax: 33012030

Home page: <http://>

Repercussões dos trabalhos do grupo

O Grupo de Pesquisa - Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis, do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CIE/INPE-MCT, em Santa Maria, e Observatório Espacial do Sul - OES/CRS/CIE/INPE - MCT, Latitude: 29°26'24"S, Longitude: 53°48'38"W, Altitude 488m, em São Martinho da Serra, RS, colabora com pesquisadores do INPE(CEA e CPTEC), da USP(DM/ICB e IAG), do DBG/CB-UFRN, do LACESM-UFSM e internacionais: Japão (Universidades de Takushoku e Rikkyo) e EUA(NASA). Linhas de Pesquisas: CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS: OZÔNIO x RADIAÇÃO, ENERGIAS RENOVÁVEIS. Pesquisa: a composição, a estrutura, os processos físicos-químicos e dinâmicos, o potencial energético renovável e o transporte de energia, com medidas in situ e fenômenos: Atmosféricos, Biosféricos e Genéticos. O Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico - PMOA, criado por Nelson Jorge Schuch em maio de 1992, executado em Convênio: CRS/CIE/INPE-MCT - LACESM/CT-UFSM, objetiva: a análise de sua concentração; o comportamento de sua "camada", a +/- 25 Km no RS, suas correlações com: Radiação Ultravioleta (UV-A, UV-B); gases traçadores (NO₂ - SO₂ -CO₂); aerossóis - queimadas; dados físicos e meteorológicos de sondagens troposféricas e estratosféricas; precipitação de partículas na Anomalia Magnética do Atlântico Sul - AMAS. Pesquisa e monitoramento da Radiação Ultravioleta - UV: UV-A (400-320 nm), UV-B (320 e 280 nm). Pesquisa da sensibilidade à Radiação UV: de seu Espectro de Ação; obtenção de Dose; do Índice Ultravioleta, I-UV; efeitos biológicos da Radiação UV-B em: nível celular, humanos, animais, vegetais, ecossistemas aquáticos. Pesquisa de Energias Renováveis com ênfase nas fontes solar e eólica. Vice-Líderes: Damaris K. Pinheiro, Marcelo B. da Rosa, Enio B. Pereira.



Relatório Final de Atividades

Recursos humanos**Pesquisadores****Total: 15**[André Passaglia Schuch](#)[Lucymara Fassarella Agnez Lima](#)[Augusta Maria Passaglia Schuch](#)[Marcelo Barcellos da Rosa](#)[Carlos Frederico Martins Menck](#)[Marcelo Pizzuti Pes](#)[Damaris Kirsch Pinheiro - \(líder\)](#)[Nelson Jesus Ferreira](#)[Enio Bueno Pereira](#)[Nelson Jorge Schuch - \(líder\)](#)[Ezequiel Echer](#)[Plínio Carlos Alvalá](#)[Fernando Luís Guarnieri](#)[Ricardo André Guarnieri](#)[Fernando Ramos Martins](#)**Estudantes****Total: 12**[Ana Marceli Soares](#)[Luana Serafini dos Santos](#)[Caroline Bertagnolli](#)[Marcus Guedes](#)[Daniel Vinicius Fiorin](#)[Nadiara Pereira](#)[Diogo Alessandro Arsego](#)[Pabulo Henrique Rampelotto](#)[Germano Possani](#)[Rafael Jonas Righi Batista](#)[Gustavo Pereira Guerra](#)[Simone Spiazzi Favarin](#)**Técnicos****Total: 5**

Anderson Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Eletrônica

Eduardo Ceretta Dalla Favera - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação

Fabrício Colvero - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico de Manutenção

Koiti Ozaki - Especialização - Analista de Sistemas

Roben Castagna Lunardi - Ensino Profissional de nível técnico - Técnico em Computação

Linhas de pesquisa**Total: 2**

- [Ciências Atmosféricas: Ozônio x Radiação](#)
- [Energias Renováveis](#)

Empresas associadas ao grupo**Total: 0****Indicadores de recursos humanos do grupo**

	Integrantes do grupo	Total
Pesquisador(es)		15
Estudante(s)		12
Técnico(s)		5

Nomes grafados em vermelho: integrantes sem Currículo Lattes ou com inconsistências nos dados de identificação entre os formulários de Currículo e de Grupo de Pesquisa.



Linha de Pesquisa Energias Renováveis

Linha de pesquisa

Energias Renováveis

Nome do grupo: [Ciências Atmosféricas - Ozônio x Radiação - Energias Renováveis](#)

Palavras-chave: Energias Renováveis; Fontes de energia renováveis - Solar e Eólica; Setor Energético;

Pesquisadores:

[Enio Bueno Pereira](#)
[Fernando Ramos Martins](#)
[Marcelo Pizzuti Pess](#)
[Nelson Jorge Schuch](#)
[Ricardo André Guarnieri](#)

Estudantes:

[Daniel Vinicius Fiorin](#)
[Diogo Alessandro Arsego](#)
[Marcus Guedes](#)
[Rafael Jonas Righi Batista](#)

Árvore do conhecimento:

Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Setor Energético;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Energias Renováveis;
Ciências Exatas e da Terra; Geociências; Fontes de energia renováveis - Solar e Eólica;

Setores de aplicação:

Produtos e serviços voltados para a defesa e proteção do meio ambiente, incluindo o desenvolvimento sustentado

Objetivo:

Tem como objetivo o estudo e o desenvolvimento de pesquisas com uma Estação de Referência (SMS) da Rede Nacional SONDA - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais, voltados ao setor energético, no Observatório Espacial do Sul, situado na região central do Rio Grande do Sul, na área de energias renováveis, com ênfase nas fontes solar e eólica.
Vice-Líder: Enio B. Pereira



Agradecimentos

Os bolsistas gostariam de agradecer aos colegas do Laboratório de Recursos de Energias Renováveis do CRS/CIE/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	1
INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2	3
OBJETIVOS	3
2.1. Objetivos do Projeto SONDA.....	3
2.2. Objetivo e Metas deste Projeto de IC	3
Capítulo 3	5
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	30
METODOLOGIA.....	30
4.1. Projeto SONDA	30
4.1.1. Estações de Referência	31
4.1.2. Estações Solares	31
4.1.3. Estações Eólicas	31
4.2. Estação de Referência do Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, RS	32
4.2.1. Torre Eólica	35
4.2.2. Anemômetros	35
4.2.3. Outros equipamentos da Estação SMS.....	38
4.3. Análise dos Dados.....	39
4.4. Avaliação do Potencial de uma Região	40
Capítulo 5	41
ATIVIDADES DOS BOLSISTAS.....	41
5.1. Revisão Bibliográfica.....	41
5.2. Operação dos Equipamentos da Estação SONDA – SMS.....	41
5.2.1. Manutenção dos equipamentos SONDA.....	41
5.2.3. Troca de Sílica Gel	41
5.2.4. Limpeza e polimento	42
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. Participação em eventos de IC e publicações dos bolsistas	43



Relatório Final de Atividades

Capítulo 6	47
RESULTADOS OBTIDOS	47
Capítulo 7	51
CONCLUSÕES	51
Referências Bibliográficas	52

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



Relatório Final de Atividades

Figura 3.19 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.	27
Figura 4.1 – Distribuição das estações SONDA no Território Nacional Brasileiro.....	30
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/CRS/CIE/INPE – MCT em São Martinho da Serra, RS.....	32
Figura 4.3 – Caixa do Datalogger junto ao computador SONDA no prédio 1 do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra.....	33
Figura 4.4 – Diagrama dos equipamentos da Estação SONDA - SMS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE - MCT.	34
Figura 4.5 – Torre Eólica da Estação SMS com a posição dos três anemômetros no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE - MCT.....	35
Figura 4.6 – Anemômetro <i>R. M. Young</i> modelo 05106.....	36
Figura 4.7 – Diagrama do “Wind Line Driver”.....	37
Figura 4.8 – Conjunto de medida de dados eólicos da Estação SONDA – SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT.....	37
Figura 4.9 – Diagrama do sensor de medida de velocidade e direção de vento.....	38
Figura 6.1: “Rosa dos Ventos” e Distribuição de Weibull para altura de 25m.	48
Figura 6.2: “Rosa dos Ventos” e Distribuição de Weibull para altura de 50m.	48
Figura 6.3: Volume do Reservatório da Usina de Jacuí.	49
Figura 6.4: “Rosa dos Ventos” e Distribuição de Weibull para períodos sazonais e altura de 50m.	50



Índice de Tabelas

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

Tabela 6.1: Valores Médios de velocidade e densidade de potência..... 49



Siglas e Abreviaturas

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
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
UFMS	- 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. Esses fatores combinados com a crescente preocupação com a preservação do meio ambiente estão impulsionando a comunidade científica a pesquisar e desenvolver fontes alternativas de energia menos poluentes, renováveis e que produzam pouco impacto ambiental (Bentley, 2002; Geller, 2003).

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/CRS/CIE/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 eólico 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/CRS/CIE/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 CRS/CIE/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:

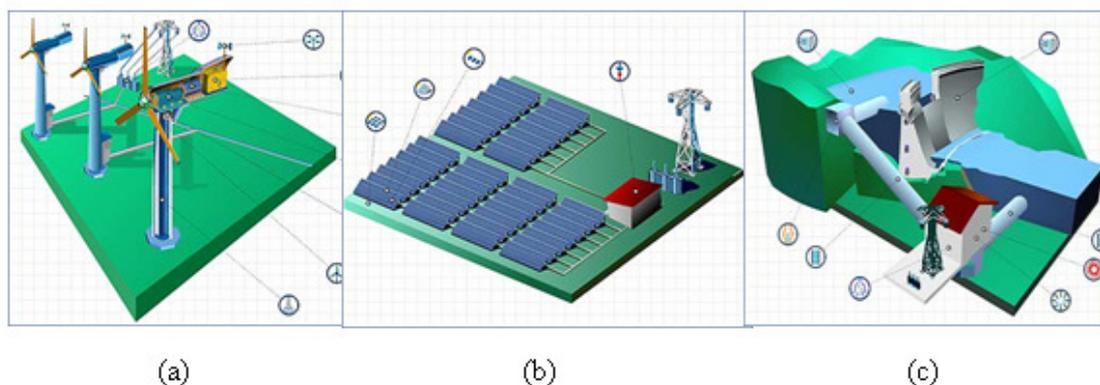


Figura 3.1 – Sistemas de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis.
(a) Sistema Eólico; (b) Sistema Solar; (c) Sistema Hidráulico.

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.

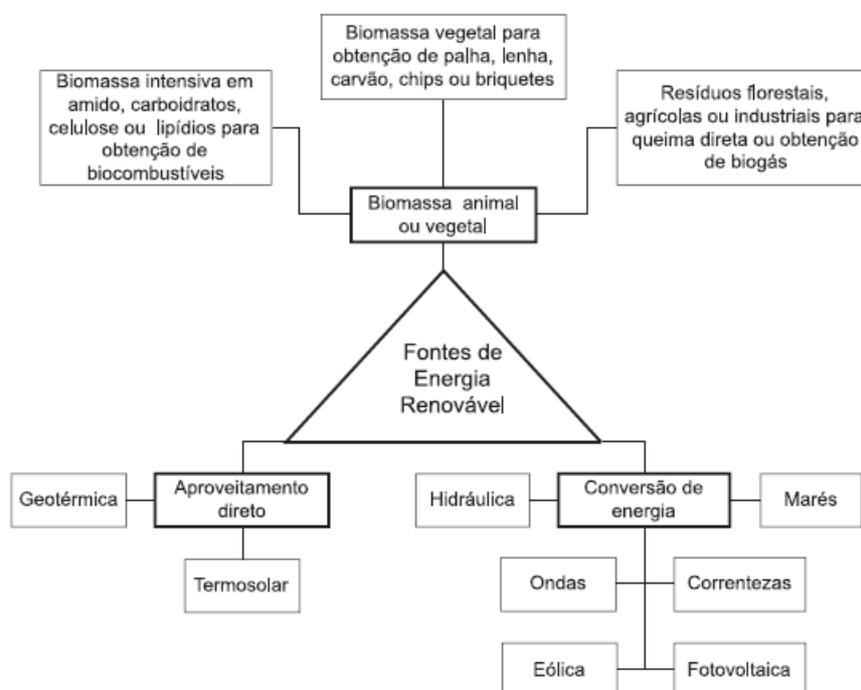


Figura 3.2 – Diagrama das fontes de energia renováveis.
Fonte: Plano Nacional de Agroenergia (2005).

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.

País	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.

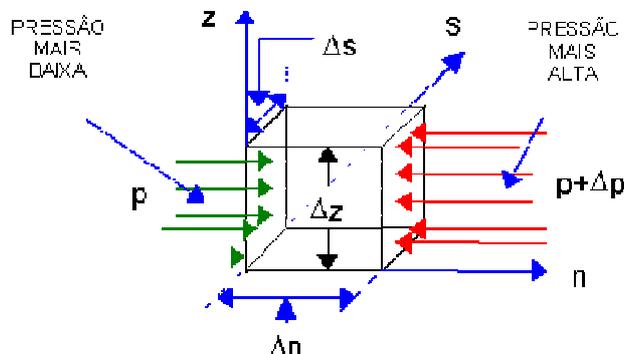


Figura 3.3 – Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

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.

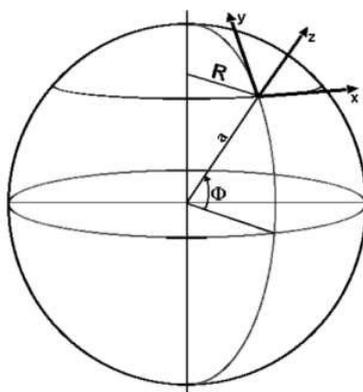


Figura 3.4 – Sistema de coordenadas fixo à Terra.
Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

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.

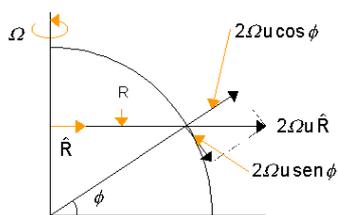


Figura 3.5 – Componentes da Força de Coriolis.
 Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

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).

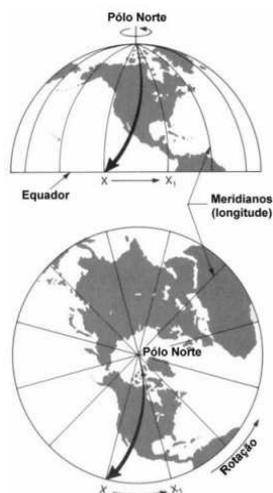


Figura 3.6 – O efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul.
 Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

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.

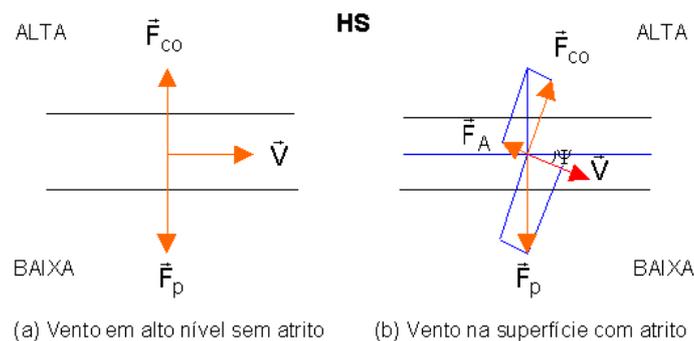


Figura 3.8 – Efeito do atrito sobre o vento.
Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2006).

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.

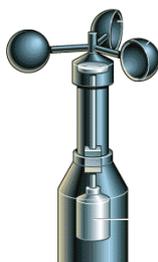


Figura 3.9 – Anemômetro de conchas. Fonte: Rincondelvago (2006).

- 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.

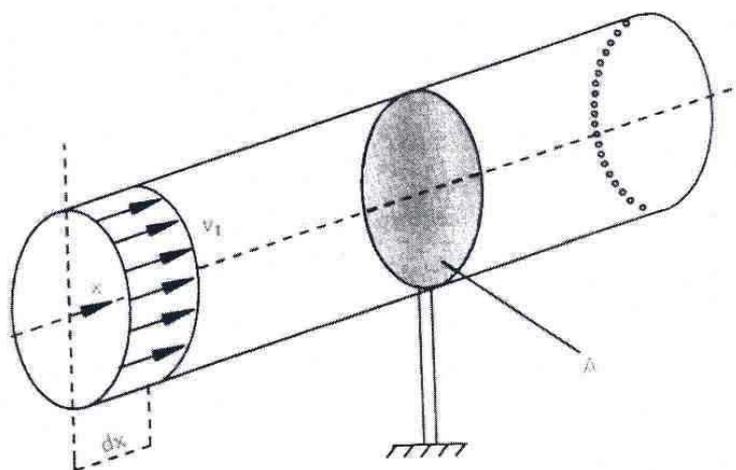


Figura 3.11 – Variação da massa através da área de varredura. Fonte: Marques (2004).

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).

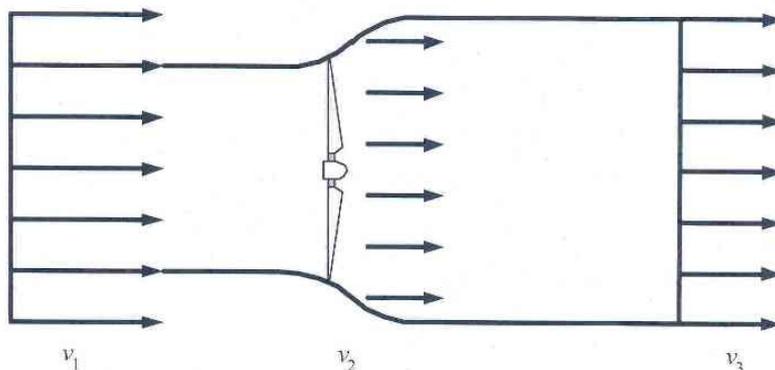


Figura 3.12 – Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.
Fonte: Marques (2004).

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)

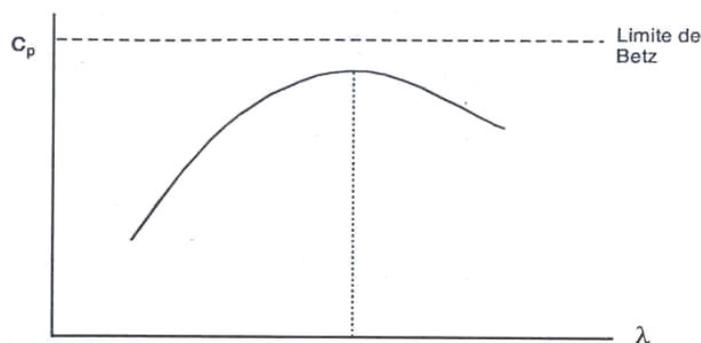


Figura 3.13 – Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica.
Fonte: Carvalho (2003).

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.

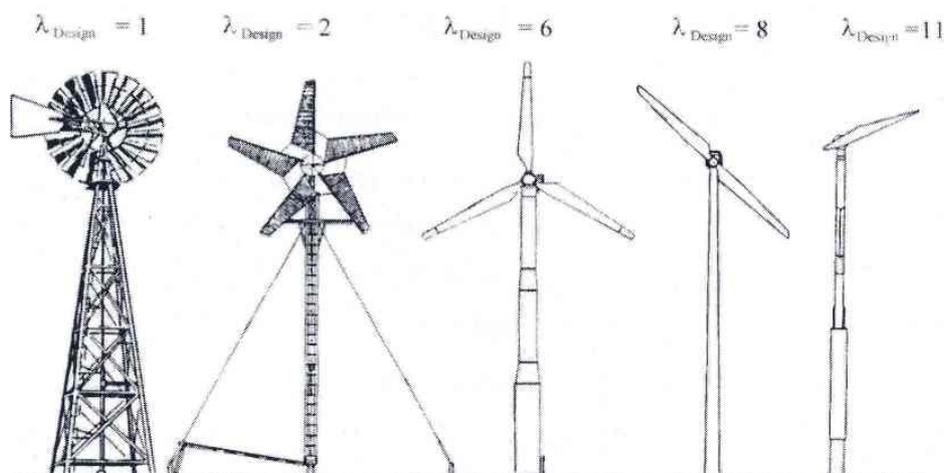


Figura 3.14 – Velocidade Específica para tipos de turbinas eólicas.

Fonte: Marques (2004).

3.4.2. Principais Componentes do Aerogerador

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

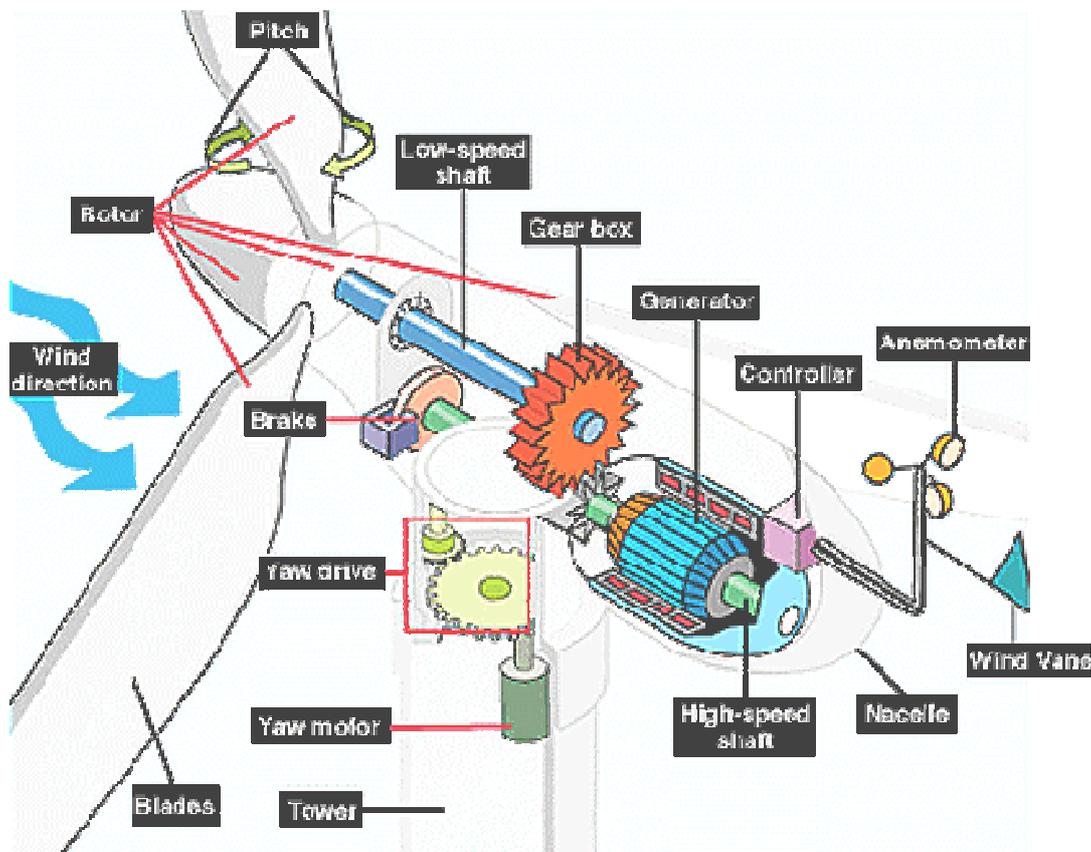


Figura 3.15 – Principais componentes de um Aerogerador. Fonte: NWTC (2004).

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.

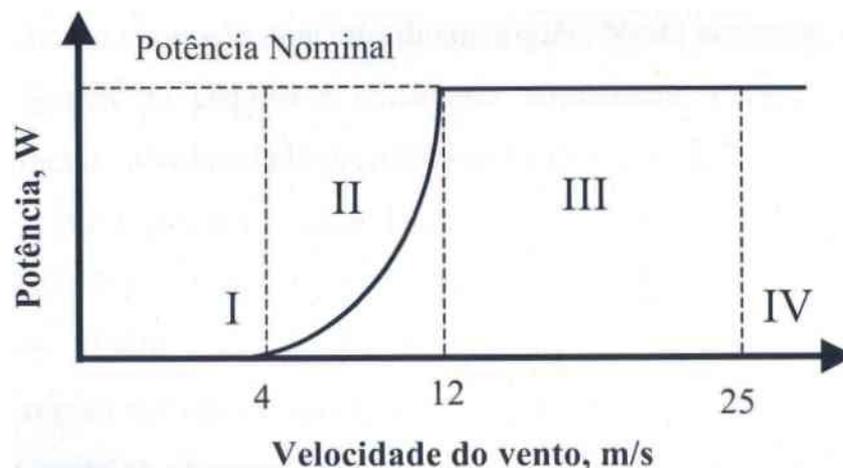


Figura 3.16 – Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador.
Fonte: Marques (2004).

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.

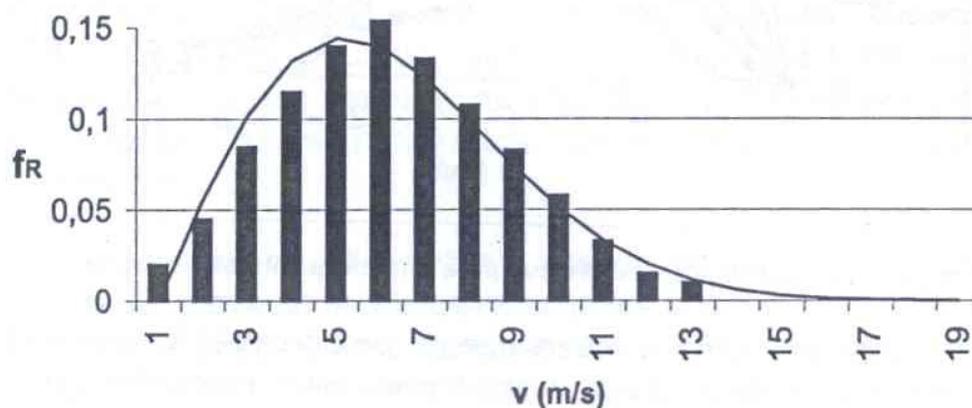


Figura 3.18 – Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh.

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.

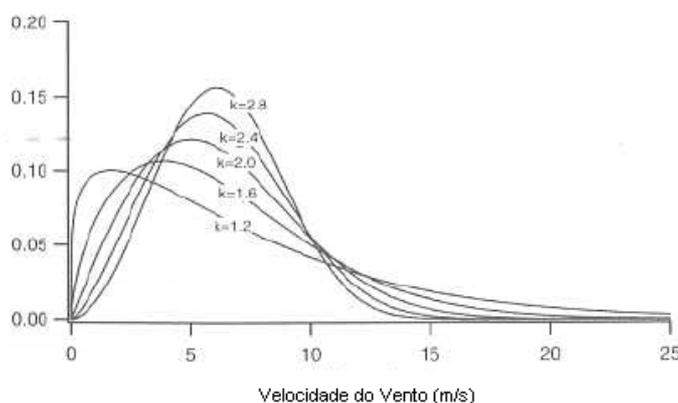


Figura 3.19 – Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma.
Fonte: Manwell et al. (2002)

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

Há muito tempo estão sendo estudados modelos matemáticos que possam descrever o vento nas camadas da superfície. Em grandes altitudes o vento se encontra no chamado balanço geostrófico, que nada mais é que um equilíbrio entre a força do gradiente de pressão e a Força de Coriolis. Em níveis mais próximos da superfície a turbulência e o atrito passam a atuar acabando com esse balanço.

O conhecimento da forma do perfil do vento (variação da velocidade do vento com a altura) é necessário, pelo menos, por duas razões: estimar a efetividade dos processos de troca vertical e através do conhecimento da velocidade do vento, num nível fixo ou de referência, é possível estimar a velocidade do vento em outros níveis para várias aplicações.

Devido à dificuldade de medição da velocidade do vento em diversas alturas, utilizam-se modelos para descrever o perfil de velocidade na camada limite utilizando. O modelo logarítmico é o modelo que melhor se ajusta a camada limite, mas esse modelo só é válido quando a camada se encontra no seu perfil de estabilidade neutra, ou seja, o seu perfil de temperatura potencial com a altura é praticamente constante.

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{z_o} \quad (3.22)$$

onde $U(z)$ é a velocidade média do vento para a altura z , k é a constante de von Karman (valor em torno de 0,4), u_* é a velocidade de atrito e z_o é o comprimento de rugosidade.

O comprimento de rugosidade de um determinado local corresponde à altura onde a velocidade do vento é igual à zero, e ele pode ser considerado constante desde que as características (relevo, vegetação, etc.) desse local não mudem. Sabendo o comprimento de rugosidade de determinada região podemos estimar a velocidade do vento em qualquer altura partindo de valores conhecidos de velocidade para uma altura de referência.

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_o}\right)} \quad (3.23)$$

Para perfis da velocidade média do vento sobre superfícies rugosas, como por exemplo, dosséis, o deslocamento do plano zero d é introduzido e a equação (3.23) transforma-se em,

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z-d}{z_o} \quad (3.24)$$

A velocidade de atrito u^* é dada por,

$$u_* = \left(\frac{\tau}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (3.25)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento, ρ_a é a densidade do ar e u^* representa a velocidade característica do fluxo e diz respeito a efetividade da troca turbulenta sobre a superfície.

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.

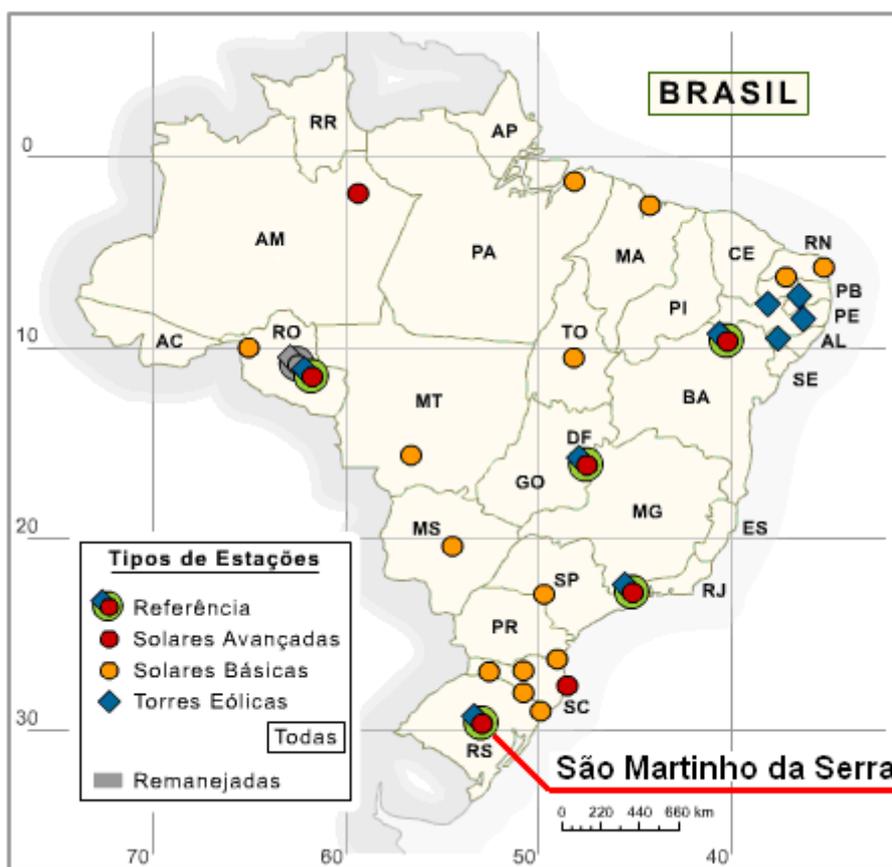


Figura 4.1 – Distribuição das estações SONDA no Território Nacional Brasileiro.
Fonte: SONDA (2006).

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/CRS/CIE/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/CRS/CIE/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 CRS/CIE/INPE – MCT.

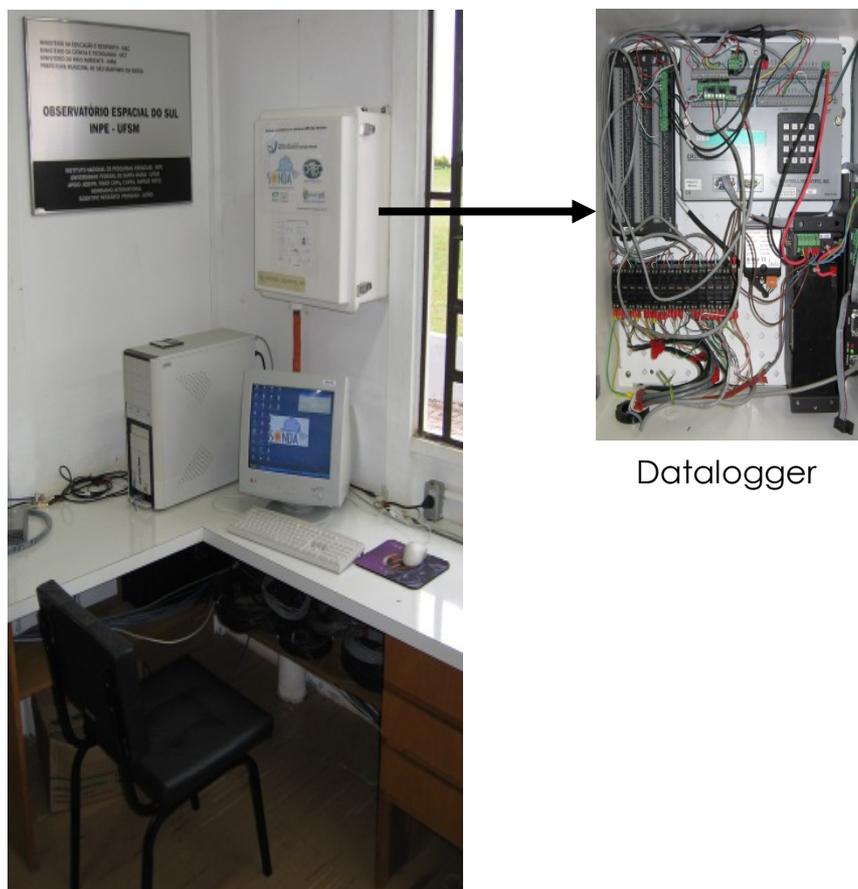


Figura 4.3 – Caixa do Datalogger junto ao computador SONDA no prédio 1 do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT, em São Martinho da Serra.

Relatório Final de Atividades

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

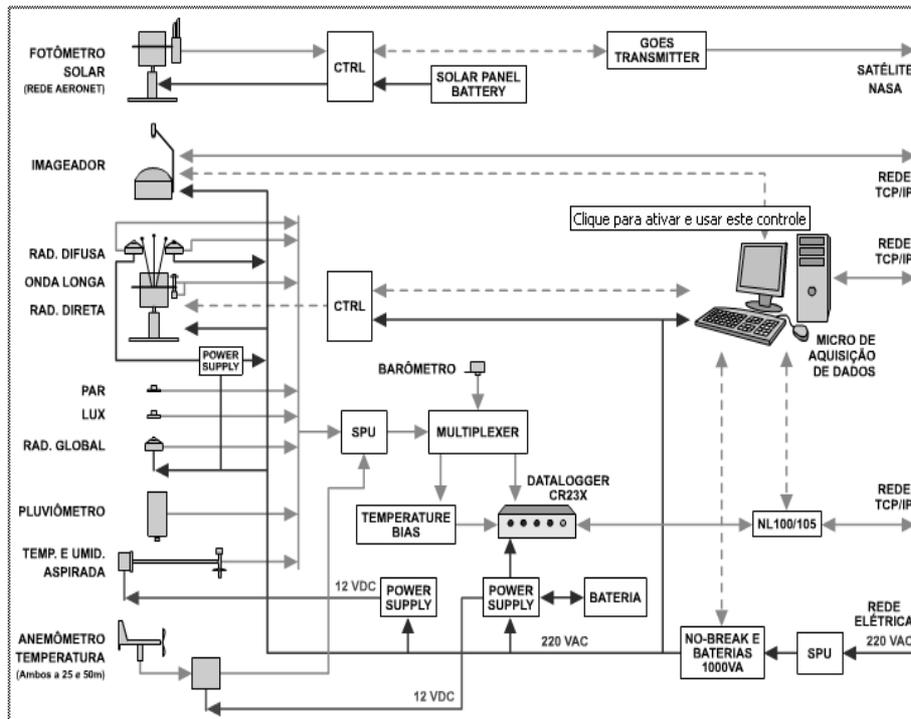


Figura 4.4 – Diagrama dos equipamentos da Estação SONDA - SMS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE - MCT. Fonte: SONDA (2006).

4.2.1. Torre Eólica

A torre eólica da Estação SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/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.

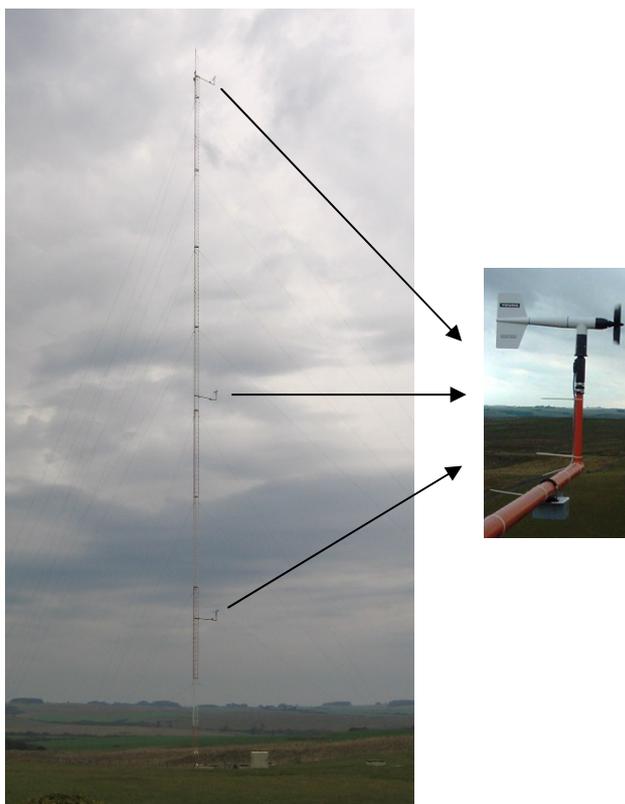


Figura 4.5 – Torre Eólica da Estação SMS com a posição dos três anemômetros no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE - MCT.

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*.

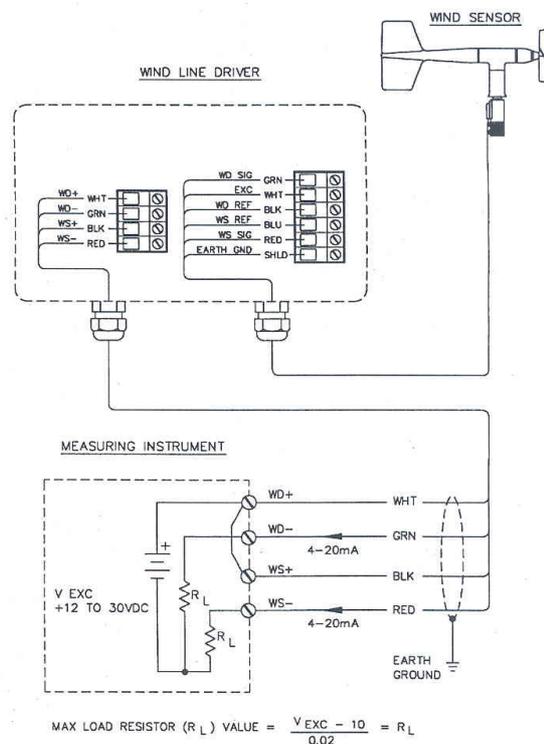


Figura 4.7 – Diagrama do “Wind Line Driver”. Fonte: Campbellsci (2006).

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

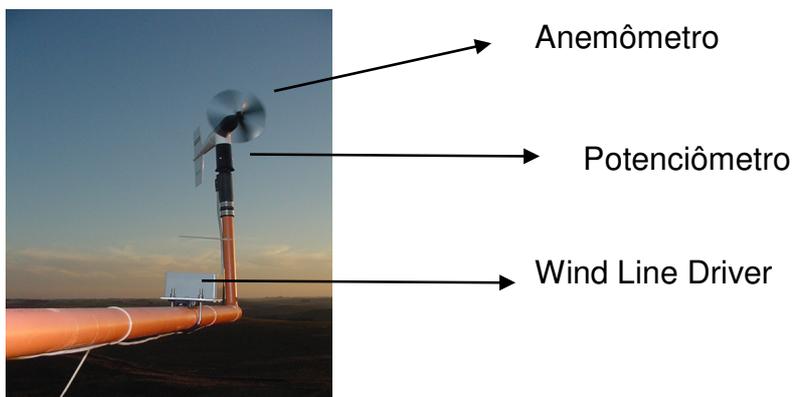


Figura 4.8 – Conjunto de medida de dados eólicos da Estação SONDA – SMS do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CIE/INPE – MCT.

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

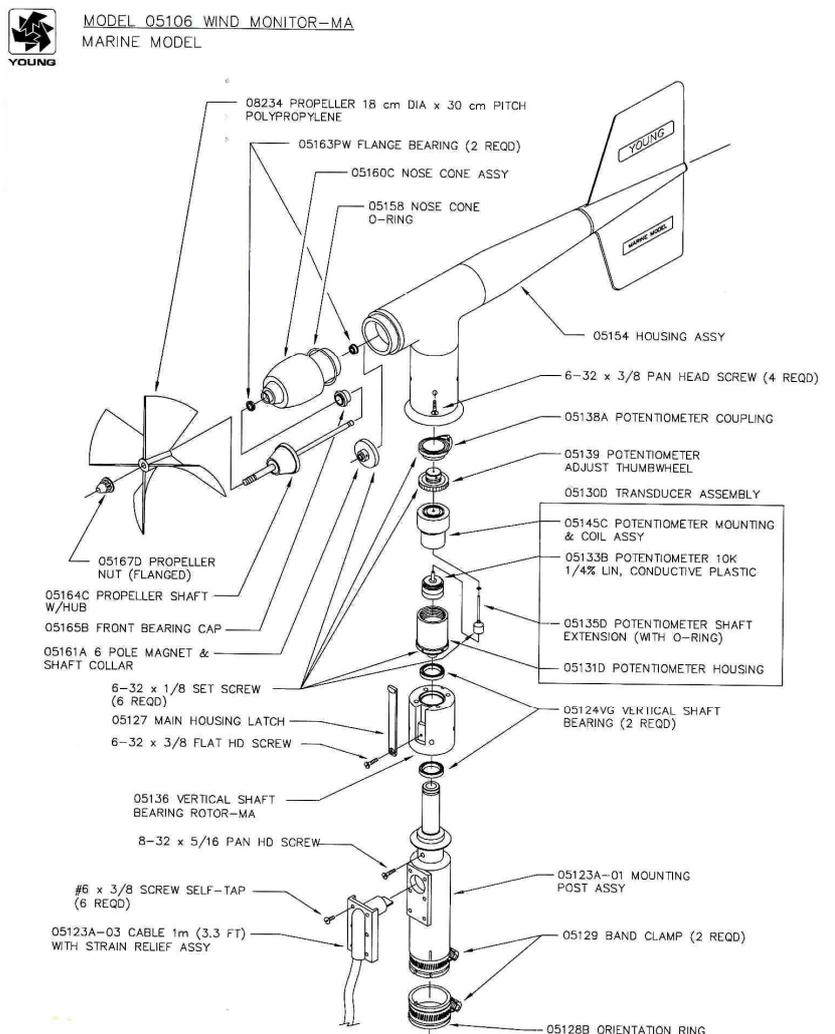


Figura 4.9 – Diagrama do sensor de medida de velocidade e direção de vento.
Fonte: Campbellsci (2006).

4.2.3. Outros equipamentos da Estação SMS.

Alem 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.

Relatório Final de Atividades

- 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, em função disso, faz-se necessária a conservação da baixa umidade em seu interior. Para isso, os medidores possuem um dessecador 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 substituir a sílica úmida por sílica seca (de coloração azul).

5.2.4. Limpeza e polimento

A limpeza dos domos de quartzo dos medidores de radiação da estação SONDA é necessária para medias 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.

5.3. 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/CRS/CIE/INPE – MCT. Esses dados são copiados e salvos no Laboratório de Recursos de Energias Renováveis (no Prédio Sede do CRS/CIE/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 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.

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. Participação em eventos de IC e publicações dos bolsistas

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

“RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – ESTIMATIVAS DETERMINADAS ATRAVÉS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E OZÔNIO ATMOSFÉRICO”.

Evento: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia – Florianópolis – SC – Novembro de 2006.

Autores: Marcelo Pizzuti Pes, Marcus Guedes, **Rafael Bertagnolli**, Daniel Fiorin, Enio Bueno Pereira, Ricardo André Guarnieri, Fernando R. Martins, Nelson Jorge Schuch.

“DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA ESTIMATIVA DE RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA A PARTIR DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL PARA O ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL”.

Evento: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia – Florianópolis – SC – Novembro de 2006.

Autores: Marcus Guedes, Marcelo Pizzuti Pes, **Rafael Bertagnolli**, Daniel Fiorin, Ricardo André Guarnieri, Fernando R. Martins, Enio Bueno Pereira, Nelson Jorge Schuch.

“ESTUDO DA ILUMINÂNCIA NATURAL EM DIAS DE CÉU CLARO EM ESTAÇÕES DA REDE SONDA.”.

Evento: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia – Florianópolis – SC – Novembro de 2006.

Autores: Daniel Fiorin, Marcus Guedes, Marcelo Pizzuti Pes, **Rafael Bertagnolli**, Ricardo André Guarnieri, Fernando R. Martins, Enio Bueno Pereira, Nelson Jorge Schuch.

“ANÁLISES DOS DADOS DE VENTOS UTILIZANDO O MODELO WASP NA REGIÃO DO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL”.

Evento: XXI Jornada Acadêmica Integrada – Santa Maria – RS – Novembro de 2006.

Autores: **Rafael Fettermann Bertagnolli**, Marcelo Pizzuti Pes, Marcus Guedes, Daniel Fiorin, Ricardo André Guarnieri, Fernando Ramos Martins, Enio Bueno Pereira, Nelson Jorge Schuch.

“ESTUDO DO POTENCIAL SOLAR DO SUL DO BRASIL”.

Evento: XXI Jornada Acadêmica Integrada – Santa Maria – RS – Novembro de 2006.

Autores: Marcus Guedes, Fernando Ramos Martins, Marcelo Pizzuti Pes, **Rafael Fettermann Bertagnolli**, Daniel Fiorin e Nelson Jorge Schuch.

“ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA DA REDE NACIONAL SONDA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL, SÃO MARTINHO DA SERRA, RS”.

Evento: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA – São José dos Campos - SP – Outubro de 2006.

Autores: Marcelo Pizzuti Pes, Marcus Guedes, **Rafael Bertagnolli**, Daniel Fiorin, Enio Bueno Pereira, Ricardo André Guarnieri, Fernando R. Martins, Nelson Jorge Schuch.

“ESTUDO DA ILUMINÂNCIA NATURAL EM DIAS DE CÉU CLARO NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL - OES/CRSPE/INPE-MCT”.

Evento: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA – São José dos Campos - SP – Outubro de 2006.

Autores: Daniel Fiorin, Marcus Guedes, Marcelo Pizzuti Pes, **Rafael Bertagnolli**, Ricardo André Guarnieri, Fernando R. Martins, Enio Bueno Pereira, Nelson Jorge Schuch.

“ESTUDO DE CASO DA INTERFERÊNCIA DO VENTO NORTE SOBRE A RADIAÇÃO SOLAR DIFUSA NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL”.

Evento: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA – São José dos Campos - SP – Outubro de 2006.

Autores: Marcus Guedes, Marcelo Pizzuti Pes, **Rafael Bertagnolli**, Daniel Fiorin, Ricardo André Guarnieri, Fernando R. Martins, Enio Bueno Pereira, Nelson Jorge Schuch.

“ESTUDO PRELIMINAR DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO EÓLICA PARA A REGIÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL”.

Evento: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – Ijuí – RS – Outubro de 2006.

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

“DETERMINAÇÃO DA ILUMINÂNCIA NATURAL A PARTIR DE DADOS DA IRRADIAÇÃO GLOBAL INCIDENTE NA SUPERFÍCIE TERRESTRE”.

Evento: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – Ijuí – RS – Outubro de 2006.

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

“ANÁLISE DE DADOS DA ILUMINÂNCIA NATURAL EM DIAS DE CÉU CLARO E SUA RELAÇÃO COM O ÂNGULO ZENITAL SOLAR”.

Evento: XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – Ijuí – RS – Outubro de 2006.

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

Capítulo 6

RESULTADOS OBTIDOS

A análise estatística de dados de velocidade e direção dos ventos permite avaliar o potencial de energia eólica de uma região de interesse. Essas informações são de extrema importância nas decisões do projeto de engenharia destinado ao aproveitamento energético dos ventos em fazendas e sítios eólicos, uma vez que possibilitam estudos de viabilidade econômica e tecnológica, como a escolha do sistema de conversão de energia a ser utilizado.

A fim de realizar análises e avaliações do potencial eólico de uma região, a ferramenta computacional WAsP® - Wind Atlas Analysis and Application Program, produzido pelo Risø – Laboratório de Energia Eólica da Dinamarca, vem sendo empregada em diversos países do mundo. Ao utilizar diversos modelos que descrevem o comportamento dos ventos na camada atmosférica próxima ao solo, é possível obter o Atlas Eólico de uma região através dos seguintes parâmetros:

- Dados de Velocidade e Direção dos Ventos;
- Rugosidade do Terreno;
- Obstáculos do Terreno;
- Mapa da região;

Os dados de velocidade e direção dos ventos utilizados foram coletados na estação de referência do projeto SONDA, em operação no Observatório Espacial do Sul (29,44°S, 53,82°O), município de São Martinho da Serra, RS. A série de dados de ventos utilizada compreende o período de agosto de 2005 a julho de 2006, totalizando um ano de dados. Dados de duas alturas de medição foram analisados: 25m e 50m.

As análises estatísticas cujos resultados são apresentados a seguir, foram realizadas empregando a ferramenta Observed Wind Climate (OWC) Wizard, presente no conjunto de rotinas do software WAsP®.

Os resultados obtidos para o anemômetro da altura de 25m são apresentados na Figura 6.1. A distribuição das direções dos ventos apresenta o sudeste (SE) como direção predominante, com uma frequência de ocorrência de 18,6%. A distribuição de Weibull para a velocidade dos ventos nesta mesma altura apresentou fator de forma (k) de 2,84 e fator de escala (A) de 5,9 m/s. O fator de forma é uma importante medida da qualidade do vento de um local; quanto maior o seu valor, mais a distribuição de frequências é “concentrada” em torno da velocidade de maior frequência de ocorrência.

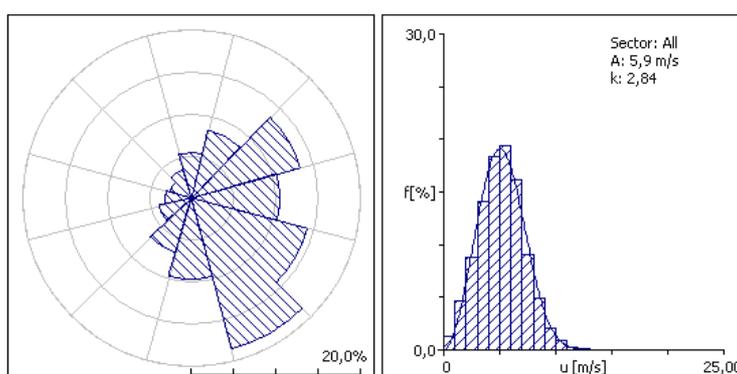


Figura 6.1: “Rosa dos Ventos” e Distribuição de Weibull para altura de 25m.

Os resultados para o anemômetro de 50m são apresentados na Figura 6.2. Nesse caso, a direção predominante – sudeste (SE) – possui uma frequência de ocorrência de 17,6%. A distribuição de Weibull apresentou fator de forma (k) de 2,76 e fator de escala (A) de 6,31 m/s.

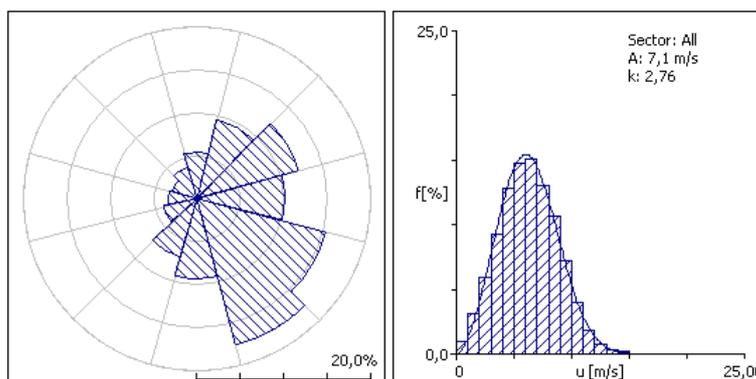


Figura 6.2: “Rosa dos Ventos” e Distribuição de Weibull para altura de 50m.

Foram obtidos os valores médios de velocidade e densidade de potência para cada série de dados dos ventos (25 e 50 metros), como mostra a Tabela 1.

Tabela 6.1: Valores Médios de velocidade e densidade de potência.

Valores Médios	Altura Anemômetros	
	25m	50m
Velocidade	5,22 m/s	6,31 m/s
Densidade de Potência	127 W/m ²	227 W/m ²

A comparação dos resultados obtidos, com a disponibilidade de outras fontes de energia no local, permite detectar a existência ou não de complementaridade entre as diversas fontes.

Sendo assim, os mesmo dados analisados anteriormente foram divididos em períodos sazonais para comparação com a fonte hídrica, Figura 6.3, onde estão localizadas as hidrelétricas que fornecem grande parte da eletricidade da região. Os resultados obtidos mostram as maiores médias de velocidades para os períodos correspondentes ao inverno e a primavera. Na altura de 50m os fatores de escala encontrados foram iguais a 7,7 m/s (inverno) e 7,3 m/s (primavera), Figura 6.4. Para o mesmo período, a vazão do Rio Jacuí apresentou os maiores valores, concluindo-se que as fontes hídrica e eólica não se complementam para o período analisado.

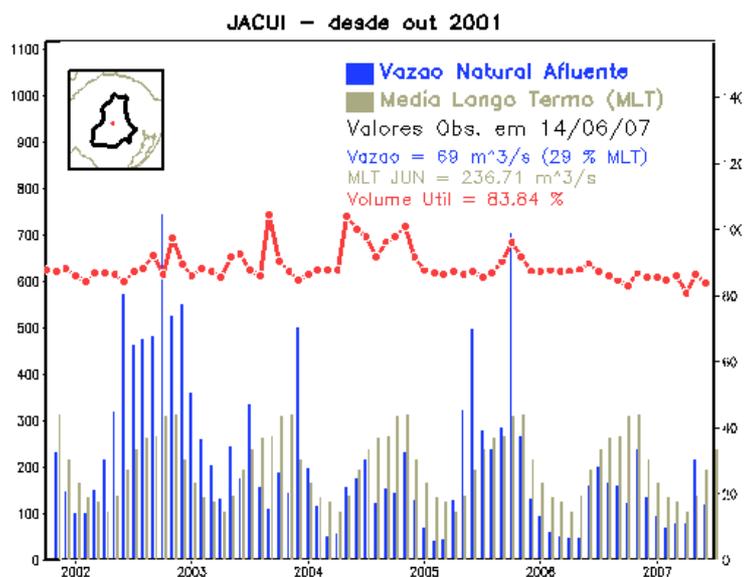


Figura 6.3: Volume do Reservatório da Usina de Jacuí. Fonte: CPTEC.

Relatório Final de Atividades

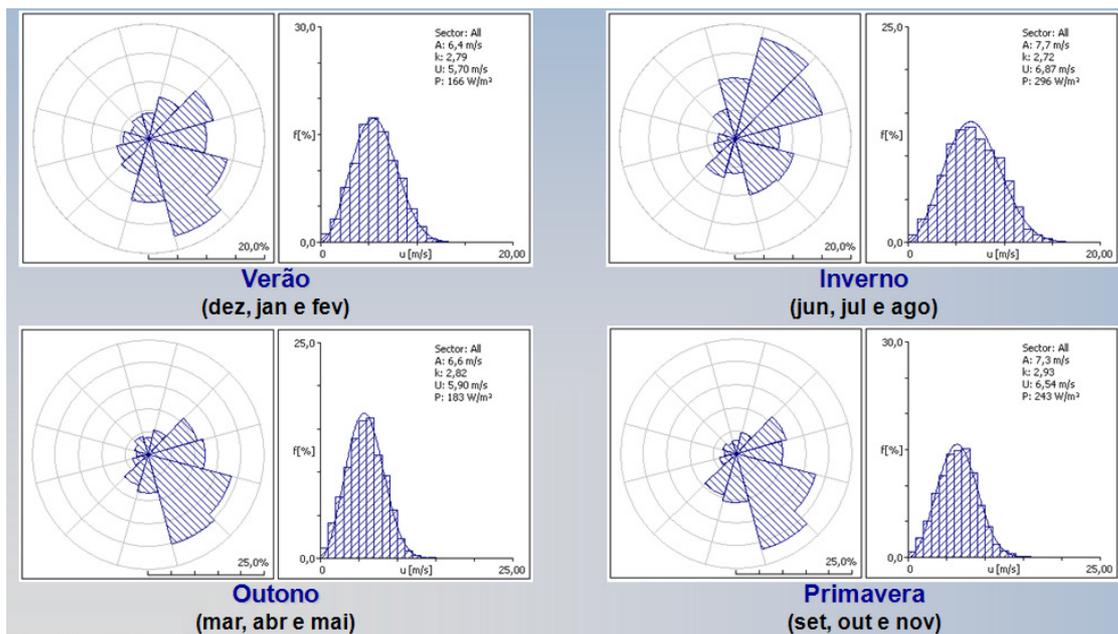


Figura 6.4: “Rosa dos Ventos” e Distribuição de Weibull para períodos sazonais e altura de 50m.

Capítulo 7

CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, verificou-se que as frequências de ocorrência de ventos da direção sudeste (SE) são predominantes para os anemômetros das duas alturas. As distribuições de Weibull para os dados de velocidade dos ventos revelaram fatores de forma (k) bastante semelhantes para 25 e 50 metros. Entretanto, a ocorrência de maiores velocidades a 50m de altura, resulta em um maior fator de escala (A).

As análises realizadas apresentam resultados coerentes com o “Atlas Eólico do Rio Grande do Sul”, publicado pela Secretaria de Energia, Minas e Comunicações – SEMC do Estado.

Ainda, durante o período de vigência da Bolsa de Iniciação Científica do Programa: PIBIC/INPE – CNPq/MCT no CRS/CIE/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. 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.

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.
- 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.
- GRIMM, A. M. **Metereologia Básica – Notas de Aula**. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/drimm/aposmeteo/>>. Acessado em 15 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.
- 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.
- 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.
- Pro Cobre – Aplicação do Cobre / Energia Sustentável. Disponível em:
<http://www.procobre.org/pr/pdf/02_energia_sust_02_pr.pdf>. Acesso em 8 jun. 2007.
- MME – Ministério de Minas e Energia. Balanço 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. 2007.
- Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Aneel. 2005. Disponível em:
<http://www3.aneel.gov.br/atlas/atlas_2edicao/index.html>. Acessado em 2 jun 2007.
- SONDA, Sistema Nacional de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estações do Projeto SONDA. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/sonda/>>. Acessado em 30 abr 2007.
- 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. 2007.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano Nacional de Agroenergia 2006 – 2011**. Brasília. 2005.
- Rincondelvago. Disponível em: <<http://html.rincondelvago.com/pitot.html>>. Acesso em 15 jun. 2006
- Campbellsci. Disponível em: <<http://www.campbellsci.com>>. 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.
- NWTC – National Wind Technology Center. **Wind Resource Information**. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/wind/animation.html#animation>>. Acesso em 20 jun. 2006.
- ENEL. Disponível em:
<<http://www.enel.it/VisitaCentraliHtml/VisitaCentralihtml/eolica/Eolica.asp>>. Acesso em 16 jun. 2007.