



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DO SUL DO BRASIL**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE – CNPq/MCT)**

**PROCESSO N° 109639/2008-1**

**Alexandre Ceretta Dalla Favera – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT**  
**Laboratório de Recursos de Energia Renováveis**  
**LRER/CRS/CCR/INPE – MCT**  
**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais**  
**CRS/CCR/INPE - MCT**  
**E-mail: alexandreceretta@lacesm.ufsm.br**

**Dr. Fernando Ramos Martins**  
Orientador  
Centro de Ciência do Sistema Terrestre  
**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**  
INPE - MCT  
**E-mail: fernando.martins@inpe.br**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**  
Co-orientador  
Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais  
**E-mail: njschuch@lacesm.ufsm.br**

**Santa Maria, Julho de 2011**



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

**Título: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL EÓLICO DO SUL DO BRASIL**

**Processo CNPq N°: 109639/2008-1**

### **Bolsista no período de Agosto/10 a Julho/11:**

**Alexandre Ceretta Dalla Favera**

Curso de Engenharia Química

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Orientadores:**

**Dr. Fernando Ramos Martins**

Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST/INPE - MCT

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE – MCT

### **Colaboradores:**

Engenheiro Químico **Rodrigo Brackmann** – ex-bolsista do LRER/CRS/CCR/INPE – MCT.

Bacharel em Física **Márcio Ceconi** – ex-bolsista do LRER/CRS/CCR/INPE – MCT.

**Eduardo Weide Luiz** – Bolsista I.C. do LRER/CRS/CCR/INPE - MCT e Graduando do curso de Meteorologia da UFSM.

**Luiz Felipe Kremer** – Bolsista I.C. do LRER/CRS/CCR/INPE - MCT e Graduando do curso de Física – Bacharel da UFSM.

**Paulo Ernesto Marchezi** – Bolsista I.C. do LRER/CRS/CCR/INPE - MCT e Graduando do curso de Química – Licenciatura da UFSM.



**Dr. Enio Bueno Pereira**

Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST/INPE

**Locais de Trabalho/Execução do Projeto:**

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

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

Trabalho desenvolvido no âmbito da Parceria, Convênio: INPE/MCT – UFSM, através do Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT – UFSM.



## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos: (i) aos funcionários, servidores do CRS/CCR/INPE - MCT e do LACESM/CT – UFSM pelo apoio e pela infra estrutura disponibilizada; (ii) ao Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT pela aprovação do Projeto de Pesquisa, que me permitiu dar os primeiros passos na Iniciação Científica e Tecnológica, propiciando grande crescimento profissional; (iii) ao Coordenador Dr. Ezzat Selim Chalhoube à Sra. Egidia Inácio da Rosa, Secretária do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, pelo constante apoio e incansável preocupação com toda a burocracia e datas limites do Programa para com os bolsistas de I. C. & T do CRS/CCR/INPE - MCT.

Um obrigado especial ao meu orientador, Dr. Fernando Ramos Martins, Pesquisador do Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/INPE – MCT, por sempre estar disposto a esclarecer dúvidas e oferecer sugestões que enriquecem o conteúdo deste e dos demais trabalhos desenvolvidos.

Agradeço ao Dr. Nelson Jorge Schuch, Pesquisador Titular Sênior III do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE-MCT e criador do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis, em Santa Maria, por acreditar na capacidade do Bolsista, orientar e auxiliá-lo no seu desenvolvimento pessoal e profissional, dedicando-lhe grande parte do seu tempo.

Agradeço aos colegas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais por toda a atenção, companheirismo e paciência prestados ao acadêmico, em especial a Rodrigo Brackmann, Márcio Ceconi e Eduardo Weide Luiz.

Agradeço aos meus amigos e à minha família, principalmente à minha Mãe **Elena Ceretta Dalla Favera**, ao meu Pai **Aluisio Rossato Dalla Favera** e meu irmão **Eduardo Ceretta Dalla Favera**, que sempre acreditaram em mim, me incentivando e me ajudando a vencer todos os obstáculos e a seguir em frente.

## RESUMO

Há uma crescente conscientização mundial em buscar novos recursos tecnológicos a fim de diminuir a emissão dos gases do efeito estufa no planeta e minimizar os danos ao meio ambiente. Essa nova consideração acarreta um crescente interesse na produção de energia elétrica através da força renovável dos ventos. Porém, como em qualquer projeto de geração de energia elétrica a primeira etapa a ser feita é o levantamento do potencial disponível da fonte a ser explorada. No caso do aproveitamento do potencial eólico é necessário a aquisição de dados de superfície por longos períodos para alcançar a confiabilidade necessária para avaliação do potencial de geração de uma região específica. Com o intuito de promover pesquisas nesse setor, o Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais (LRER/CRS/CCR/INPE - MCT), em parceria com o Centro de Ciência do Sistema Terrestre, realiza pesquisas sobre a disponibilidade do potencial eólico no Rio Grande do Sul, através de estudos do comportamento dos ventos na região. O estudo procura identificar o melhor modelo estatístico para modelar a intermitência dos ventos, avalia o comportamento anual e sazonal do regime de ventos e define o comprimento de rugosidade do terreno da região. Os dados anemométricos são coletados da plataforma e anemométrica do Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) em operação desde 2004 no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, região central do Rio Grande do Sul. A coleta dos dados de velocidade e direção dos ventos horizontais é feita por três anemômetros - “*Wind Monitor-MA Model 05106*” – da “*R. M. Young Company*” - instalados nas alturas de 10, 25 e 50 metros acima do solo, acoplados na torre anemométrica da estação. A partir do banco de dados coletados na estação são desenvolvidos e validados modelos para estimativa do potencial energéticos. A série de dados utilizada compreende o período de janeiro de 2005 a Janeiro de 2011. Estudos comparando as distribuições estatísticas de Rayleigh, Weibull e Log Normal foram aplicados para verificar qual apresenta melhor adequação ao perfil eólico da região. Análises estatísticas sobre a sazonalidade dos ventos, empregando ajustes de parâmetros de distribuições de frequência são constantemente atualizadas nos últimos anos. Através do uso ferramentas computacionais como o software WasP (“*Wind Atlas Analysis and Application Program*”), são calculadas a velocidade média, a persistência do regime de ventos da região e a densidade de potência eólica, informações essenciais para o cálculo do potencial energético disponível. Complementarmente, são estimadas as direções predominantes dos ventos tanto a nível anual



como sazonal. De modo geral, os ventos tiveram maiores frequências na direção sudeste (SE) durante todo o ano, porém na época de Outono e Inverno a direção noroeste (NE) mostrou alta frequência. Dentre os modelos estudados, todos apresentaram bom ajuste aos ventos da região central do Rio Grande do Sul, porém as distribuições de Weibull e Rayleigh apresentaram os melhores ajustes e menores desvios. Os valores de velocidade média (U), densidade de potência (P) e fator de escala (A) da distribuição estatística de Weibull apresentaram pequena variação sazonal, indicando um comportamento constante ao longo do ano o que pode favorecer a implantação de plantas eólicas na região. As maiores densidades de potencia foram exibidas na Primavera e no Inverno tanto para as alturas de 25 quanto de 50 metros. A partir do estudo foi possível traçar um esboço do potencial eólico para a região central do Rio Grande do Sul.



## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	4
<b>SUMÁRIO</b> .....	7
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	9
<b>SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	13
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	15
<b>INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA</b> .....	15
2.1. <i>O Projeto SONDA</i> .....	15
2.1.1. <i>Controle de Qualidade dos dados pelo Projeto SONDA</i> .....	16
2.2. <i>Estação SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul</i> .....	18
2.3. <i>Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – LRER/CRS/CCR/INPE - MCT</i> 22	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	23
<b>ENERGIA EÓLICA</b> .....	23
3.1. <i>Histórico da Energia Eólica</i> .....	23
3.2. <i>Panorama da Energia Eólica</i> .....	25
3.3. <i>Potencial Eólico Brasileiro</i> .....	26
3.4. <i>Potencial eólico do Rio Grande do Sul</i> .....	27
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	29
<b>VENTO</b> .....	29
4.1. <i>O Vento – Características gerais</i> .....	29
4.1.1. <i>Força de Gradiente de Pressão</i> .....	29
4.1.2. <i>Força de Coriolis</i> .....	31
4.1.3. <i>Força de Atrito</i> .....	34
4.2. <i>O Vento Geostrófico</i> .....	34
4.3. <i>Ventos na Camada de Atrito</i> .....	35
4.4. <i>Circulação global idealizada</i> .....	36
4.5. <i>Medição do Vento</i> .....	38
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	41
<b>AEROGERADORES</b> .....	41
5.1. <i>Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica</i> .....	41
5.2. <i>Principais Componentes de um Aerogerador</i> .....	44
5.3. <i>Modos de Operação de um Aerogerador</i> .....	46
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	48
<b>AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS DE VENTOS</b> .....	48
6.1. <i>Distribuição de frequências dos dados eólicos</i> .....	48
6.2. <i>Comprimento de Rugosidade</i> .....	52



<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>56</b>
<b>ATIVIDADES DESENVOLVIDAS</b> .....	<b>56</b>
7.1. <i>Manutenção dos equipamentos da estação SONDA – SMS</i> .....	56
7.2. <i>Coleta, Redução e Análise dos Dados da estação SONDA – SMS</i> .....	57
7.3. <i>Troca e manutenção do fotômetro Cimel</i> .....	58
7.4. <i>Participação de eventos com apresentação de Trabalhos</i> .....	59
<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>61</b>
<b>METODOLOGIA APLICADA AOS DADOS DE VENTO</b> .....	<b>61</b>
8.1. <i>Obtenção dos dados de ventos</i> .....	61
8.2. <i>Estudo comparativo entre as distribuições estatísticas que melhor se adequam ao perfil dos ventos para a estação SONDA – SMS</i> .....	62
8.3. <i>Estudo do comportamento anual e sazonal do regime de ventos</i> .....	64
8.4. <i>Cálculo do comprimento de rugosidade do local</i> .....	64
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>66</b>
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>66</b>
9.1. <i>Estudo comparativo entre as distribuições estatísticas que melhor se adequam ao perfil dos ventos para a estação SONDA – SMS</i> .....	66
9.2. <i>Comportamento anual e sazonal do regime de ventos</i> .....	67
9.3. <i>Cálculo do comprimento de rugosidade do local</i> .....	70
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>72</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>73</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. (a) Representação da matriz de oferta de energia primária brasileira; (b) Formas de energia utilizadas para a geração de eletricidade no Brasil. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006. ....	14
Figura 2.1. Mapa com as localizações das estações SONDA no Território Brasileiro. Fonte: SONDA, 2011.....	16
Figura 2.2. Códigos de validação do Projeto SONDA para três situações diferentes. Fonte: SONDA, 2011.....	18
Figura 2.3. Gráficos contendo informações sobre a qualificação de dados da estação SONDA – SMS para parte do ano de 2011. Fonte: SONDA, 2011.....	18
Figura 2.4. Estação solarimétrica e anemométrica SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS. 19	
Figura 2.5. Torre Anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT. Em destaque o posicionamento dos anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros.....	20
Figura 3.1. Moinho de vento típico da Holanda. Fonte: CRESESB, 2008.....	23
Figura 3.2. (a) Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo. (b)Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1980 e 2002. Fonte: Gasche Twele, 2002.....	25
Figura 3.3. Prognóstico para o crescimento das fontes renováveis na matriz elétrica mundial. 26	
Figura 3.4. Velocidade média do vento a altura de 50 metros no Território Brasileiro. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. ....	27
Figura 3.5. Vento médio anual a 50 metros de altura no Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Eólico: Rio Grande do Sul, 2002.....	28
Figura 4.1. Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido. Fonte: Grimm, 1999..	30
Figura 4.2. Sistema de coordenadas fixo à Terra (Sistema não-inercial). Fonte: Grimm, 1999.	31
Figura 4.3. Componentes da Força de Coriolis. Fonte: Grimm, 1999. ....	33
Figura 4.4. O Efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul. Fonte: Grimm, 1999. .	33
Figura 4.5. Evidência do efeito da força de Coriolis em função da latitude.....	34
Fonte: Amêndola, 2007. ....	34
Figura 4.6. O vento geostrófico no Hemisfério Sul. Fonte: Grimm, 1999. ....	35
Figura 4.7. Efeito do atrito sobre o vento. Fonte: Grimm, 1999.....	36
Figura 4.8. Circulação global numa Terra sem rotação (Hadley). Fonte: Grimm, 1999. ....	37
Figura 4.9. Circulação global idealizada no modelo de circulação de três células. Fonte:	

Grimm, 1999.	37
Figura 4.10. Catavento tipo Wild. Fonte: Grimm, 1999.....	39
Figura 4.11. Anemômetro de conchas. Fonte: Rincondelvago, 2009. ....	40
Figura 4.12. Anemômetro de hélice. Fonte: Campbellsci, 2009.....	40
Figura 5.1. Variação da massa através da área de varredura. Fonte: Marques,2004.....	42
Figura 5.2. Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.Fonte: Marques, 2004.	43
Figura 5.3. Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica. Fonte: Carvalho, 2003.	44
Figura 5.4. Velocidade Específica para diferentes tipos de turbinas eólicas. Fonte: Marques, 2004.	44
Figura 5.5. Principais componentes de um Aerogerador.Fonte: Amêndola, 2007. ....	45
Figura 5.6. Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador. Fonte: Amêndola, 2007.....	47
Figura 6.1. Exemplo de distribuição estatística para dados de ventos.Fonte: Carvalho, 2003.	49
Figura 6.2. Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh. Fonte: Carvalho, 2003.....	51
Figura 6.3. Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Manwell, et al., 2002.	52
Figura 6.4. Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) é a altura na qual a velocidade é nula.Fonte: Martins, F.R. et al., 2007.....	54
Figura 6.5. Modelo de rugosidade sobreposto ao relevo sombreado.Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001. ....	55
Figura 7.1. Imageador Total Sky Imager TSI-440 (YES, Inc) instalado na estação SONDA – SMS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT. ....	57
Figura 7.2. Diagrama da configuração local dos equipamentos instalados na estação SONDA – SMS.Fonte: SONDA, 2011. ....	57
Figura 8.1. Anemômetro R. M. Young modelo 05106.Fonte: Campbellsci, 2009.....	62
Figura 8.2. Equipamento de medida de dados eólicos da estação SONDA – SMS, instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.....	62
Figura 9.1. Relação entre os dados medidos e os estimados pelas distribuições de Weibull, Log Normal e Rayleigh. ....	67
Figura 9.2. Distribuição estatística Anual dos ventos a 25m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.....	68
Figura 9.3. Distribuição estatística Anual dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT. ....	68
Figura 9.4. Distribuição estatística Sazonal dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT. ....	70



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1. Significado dos códigos de validação dos dados SONDA. Fonte: SONDA, 2011.	17
Tabela 6.1. Classificação da rugosidade de superfícies típicas. Fonte: Krohn, S., 2001.....	55
Tabela 9.1. Validação para as distribuições estatísticas através do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE. ....	67
Tabela 9.2. Parâmetros da análise estatística dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT. ....	68
Tabela 9.3. Parâmetros da análise estatística sazonal dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT. ....	69
Tabela 9.4. Análise estatística sazonal dos ventos em suas direções predominantes a 25 e 50 metros.	70



## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

AERONET - *AErosol RObotic NETwork*

AWEA – *American Wind Energy Association*

BSRN - *Baseline Surface Radiation Network*

CCD - *Charge Coupled Device*

CCST - Centro de Ciência do Sistema Terrestre

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CRS - Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

EREC – *European Renewable Energy Council*

EWEA – *European Wind Energy Association*

GWEC – *Global Wind Energy Council*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

LACESM - Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria

LIM – Laboratório de Instrumentação Meteorológica

LRER - Laboratório de Recursos de Energia Renováveis

MBE - *Mean Bias Error*

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia

NIP - *Normal Incidence Pyrheliometer*

NIR - *Near Infra Red*

OES - Observatório Espacial do Sul

PAR - *Photosynthetically Active Radiation*

PC - *Personal Computer*

PIR – *Precision Infrared Radiometer*

PMOA - Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico

RMSE - *Root Mean Square Error*

SMS - São Martinho da Serra

SONDA - Sistema de Organização de Dados Ambientais

TSI - *Total Sky Imager*

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria

USB – *Universal Serial Bus*

WMO - *World Meteorological Organization*

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O Brasil vem ao longo das décadas apresentado grande crescimento tanto em atividades econômicas quanto na melhoria da qualidade de vida de sua população. Porém para que esse ciclo de desenvolvimento não seja interrompido é preciso que a suprimento de energia também cresça. Agregado a isso, o esgotamento dos recursos hídricos e a influência da variabilidade climática tem comprometido a segurança energética do país (Pereira, 2006). Por outro lado, a queima de combustíveis fósseis não é uma alternativa recomendada em razão das consequências ambientais relacionadas à emissão de gases do efeito estufa e danos ao meio ambiente decorrentes da ação de poluentes resultantes da combustão que compromete a qualidade de vida da sociedade em geral. Dessa forma, torna-se necessário o emprego de formas alternativas de fontes de energia, sendo as fontes renováveis, como a eólica, a solar e a hidráulica, as menos impactantes ao meio ambiente para a geração de eletricidade. A Figura 1.1 apresenta a atual conjuntura energética do Brasil. No Brasil, a energia hidráulica é a principal fonte de energia para a geração de eletricidade, apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, sua implementação causa sérios impactos ambientais associados ao alagamento de grandes áreas resultando na alteração do uso de solo, deslocamento de populações ribeirinhas, prejuízos à fauna e flora entre outros (Pereira, 2006).

A fonte eólica e a solar vêm se expandindo rapidamente por todo o mundo como meio alternativo para a produção de energia elétrica, isso porque é de caráter renovável e baixo impacto ao meio ambiente. No entanto, a atração de investimentos e a realização de ações efetivas ao desenvolvimento tecnológico e científico de novas fontes energéticas requerem a realização de estimativas da disponibilidade e distribuição dos seus recursos ao longo do território nacional, além do estabelecimento de um banco de dados acessível e confiável. Dentre as fontes energéticas “limpas”, a energia mecânica contida no vento vem se destacando e demonstra potencial para contribuir significativamente no atendimento dos requisitos necessários quanto aos custos de produção, segurança e sustentabilidade ambiental (GWEC, 2006).

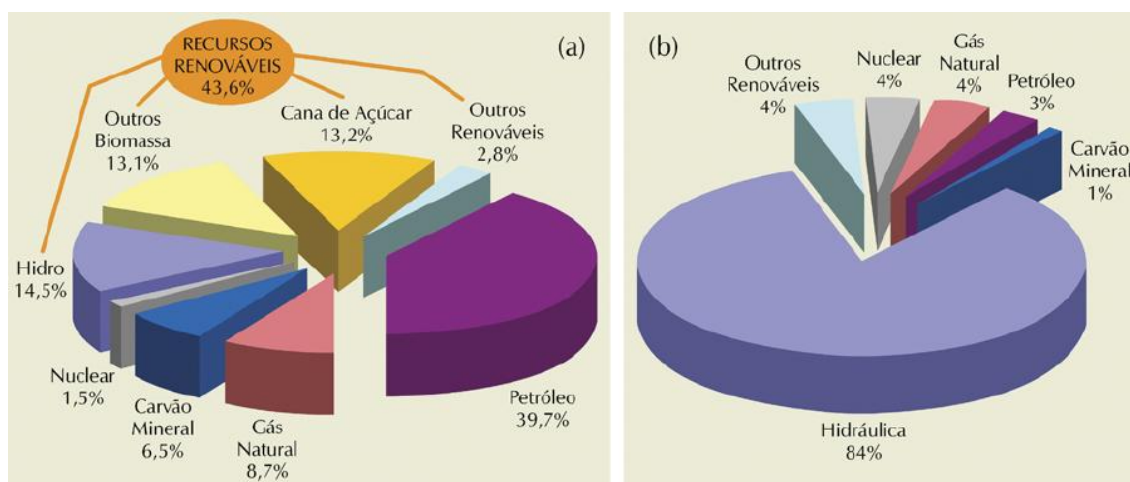


Figura 1.1.(a) Representação da matriz de oferta de energia primária brasileira; (b) Formas de energia utilizadas para a geração de eletricidade no Brasil. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

A pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico vêm recebendo grandes incentivos em todo o mundo, principalmente após o relatório do IPCC divulgado em Fevereiro de 2007 (IPCC, 2007). No Brasil, o Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST/INPE) em conjunto com o CPTEC/INPE – MCT desenvolve o Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) com o intuito de realizar medidas solarimétricas, eólicas e de outras variáveis meteorológicas necessárias ao estabelecimento de um banco de dados aplicado ao setor de energia.

Inserido neste contexto, o Projeto de Iniciação Científica e Tecnológica tem por objetivo avaliar o potencial eólico da região central do Estado do Rio Grande do Sul, estudar o comportamento anual e sazonal do regime de ventos na região e determinar o comprimento de rugosidade do terreno e qual distribuição estatística melhor se adapta ao perfil eólico da região.

## CAPÍTULO 2

### INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA

#### 2.1. O Projeto SONDA

A rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais aplicados ao setor de energia) tem como principal objetivo a aquisição de dados de irradiação solar, dados eólicos e meteorológicos a partir de uma rede de estações de superfície distribuídas pelo território brasileiro. Os dados coletados são destinados à avaliação e ao refinamento de modelos para estimativa e previsão do potencial energético renovável, principalmente o solar e o eólico. O foco das atividades da rede SONDA é prover informações adequadas e confiáveis sobre a disponibilidade e variabilidade dos recursos de energia solar e eólica no território nacional destinadas ao setor de planejamento energético público e privado. Os dados coletados estão disponíveis para acesso público em ([www.sonda.ccst.inpe.br/](http://www.sonda.ccst.inpe.br/)) após um processo controle de qualidade.

As estações de superfície da rede SONDA estão instaladas em diversos sítios do território brasileiro, conforme apresentado na Figura 2.1, de modo a possibilitar ampla cobertura das regiões com maior potencial para geração energética. As estações são classificadas como solarimétricas(S), anemométricas(A) ou solarimétricas e anemométricas (SA) conforme a configuração e os equipamentos instalados.

A rede SONDA possui quatro estações solarimétricas e anemométricas (SA) localizadas em Petrolina – PE, Brasília –DF, Ourinhos – SP e São Martinho da Serra – RS. A localização dessas estações foi estabelecida de modo a representar as principais regiões macroclimáticas do país: a região semiárida do Nordeste, a região do cerrado no Planalto Central, a região subtropical da mata Atlântica e a região de clima temperado no sul do Brasil (Martins et al., 2007). Essas estações são as mais completas do Projeto SONDA, pois possuem sensores solares, meteorológicos e eólicos que realizam as seguintes medidas:

- Dados Solares – radiação global horizontal, radiação direta normal, radiação difusa horizontal, radiação de onda longa descendente, radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e iluminância (Lux);
- Dados Meteorológicos – temperatura, umidade relativa e pressão do ar atmosférico à superfície e precipitação de chuva;

- Dados Eólicos – 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.

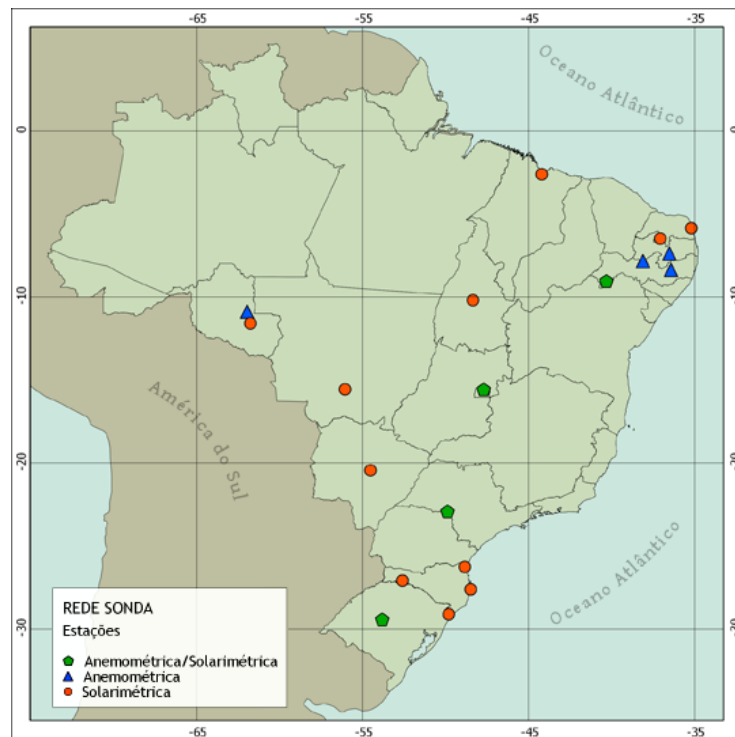


Figura 2.1. Mapa com as localizações das estações SONDA no Território Brasileiro. Fonte: SONDA, 2011.

### 2.1.1. Controle de Qualidade dos dados pelo Projeto SONDA

O processo de qualificação aplicado aos dados das estações da rede SONDA objetiva identificar através de algoritmos numéricos a confiabilidade dos dados coletados. Os critérios adotados seguem padrões internacionais da BSRN (*Base line Surface Radiation Network*) para os dados de irradiação solar, e da WebMET para os dados meteorológicos e eólicos. A qualificação não os modifica ou exclui, apenas sinaliza os dados suspeitos de estarem incorretos, deixando a critério do usuário sua utilização.

O procedimento de controle de qualidade avalia os dados coletados com o intuito de:

- Sinalizar valores fisicamente impossíveis de ocorrer;
- Sinalizar valores que podem acontecer em eventos extremamente raros;
- Sinalizar inconsistências em dados coletados por diferentes sensores em operação na estação; outras variáveis da mesma estação;



- Sinalizar valores inconsistentes quando comparados com estimativas fornecidas por modelos numéricos físicos ou estatísticos;
- Sinalizar valores inconsistentes quando acompanhado a evolução temporal da variabilidade das medidas realizadas.

O processo de controle de qualidade é composto por 4 etapas sequenciais, com sinalização através de códigos numéricos com quatro dígitos, que classificam o valor medido dentro dos parâmetros apresentados na Tabela 2.1. Um detalhamento maior do procedimento de qualificação pode ser obtido em [sonda.ccst.inpe.br](http://sonda.ccst.inpe.br).

Tabela 2.1. Significado dos códigos de validação dos dados SONDA. Fonte: SONDA, 2011.

Código	Significado
0	Nenhum procedimento foi executado
2	Dado suspeito de ser incorreto
5	Procedimento não pode ser executado
9	Dado de boa qualidade ou não suspeito

Os códigos apresentados na Figura 2.2 representam três situações diferentes. No primeiro exemplo, o dado foi analisado por todos os algoritmos sem ter sido sinalizado como suspeito. Nos outros dois exemplos, os dados foram sinalizados suspeitos, respectivamente, nos algoritmos 3 e 1.

Com objetivo de facilitar a avaliação da qualidade de cada arquivo de dados, são disponibilizados gráficos simplificados do resultado da qualificação, onde podem ser vistos os percentuais de aprovação em cada uma das etapas. O gráfico relativo aos dados solares da estação SONDA de São Martinho da Serra (SONDA-SMS) para o parte do ano de 2011 é apresentado como exemplo na Figura 2.3.

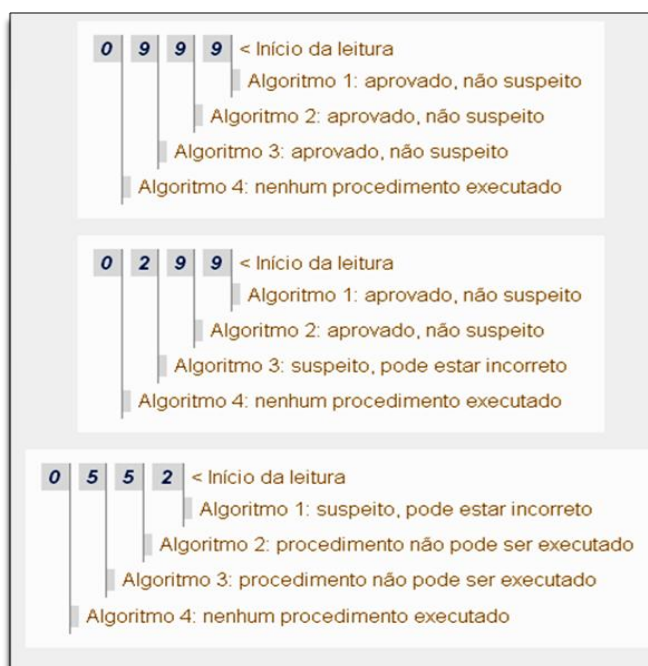


Figura 2.2. Códigos de validação do Projeto SONDA para três situações diferentes. Fonte: SONDA, 2011.

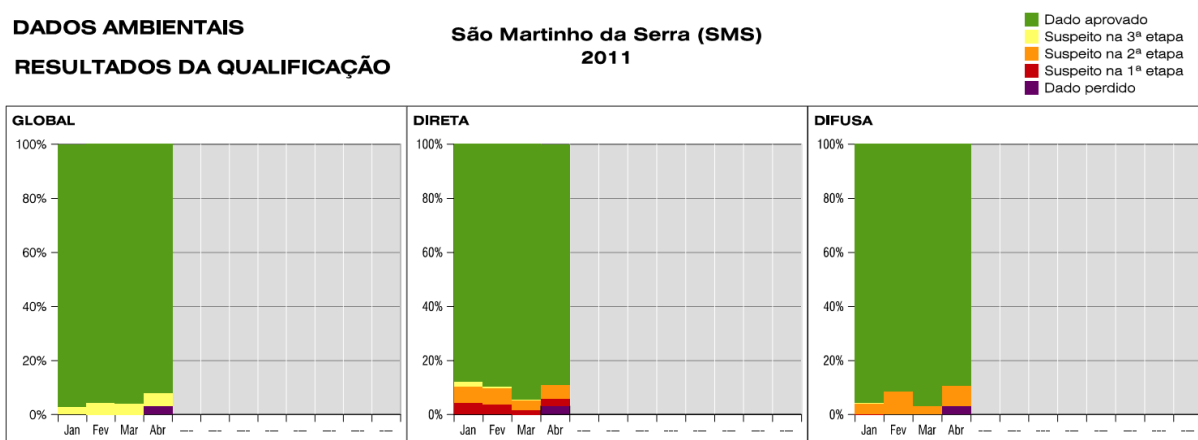


Figura 2.3. Gráficos contendo informações sobre a qualificação de dados da estação SONDA – SMS para parte do ano de 2011. Fonte: SONDA, 2011.

## 2.2. Estação SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul

A estação SONDA – SMS está instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, na latitude  $29^{\circ} 26' 34''$  S e longitude  $53^{\circ} 49' 23''$  O, no município de São Martinho da Serra – RS, pertencente ao Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, Santa Maria - RS.

A implantação da estação SONDA - SMS ocorreu no mês de julho de 2004 e marcou o início do funcionamento da rede SONDA. A coleta de dados teve início no dia 1º de Agosto de 2004 e continua sendo realizada de forma ininterrupta.

A estação é constituída por uma plataforma de três metros de altura aterrada ao lado do Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul, onde estão instalados os sensores solarimétricos e sensores meteorológicos do projeto SONDA, juntamente com os equipamentos do Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA), conforme apresentado na Figura 2.4.



Figura 2.4. Estação solarimétrica e anemométrica SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.

Além da plataforma, a estação SONDA-SMS possui uma torre anemométrica de 52 metros de altura mostrada na Figura 2.5, onde estão instalados 3 anemômetros para monitorar a velocidade e direção do vento horizontal em alturas padrões de 10, 25 e 50 metros.

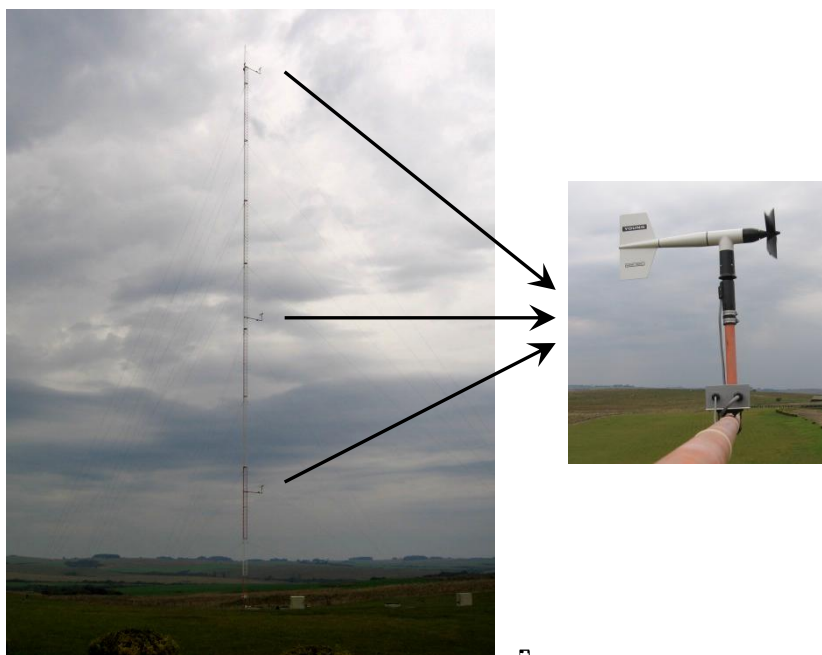


Figura 2.5. Torre Anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT. Em destaque o posicionamento dos anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros.

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.

Os equipamentos instalados na estação SONDA – SMS estão descritos abaixo:

- Piranômetro CM 21 (*Kipp&Zonen*) – efetua medidas de radiação solar global na faixa de 300 a 2800 nm. Possui um sistema de ventilação CV 2 (*Kipp&Zonen*) para melhoramento de seu desempenho;
- Piranômetro CM 22 (*Kipp&Zonen*) – realiza medidas de radiação solar difusa na faixa de 200 a 3600 nm. Possui ocultador do disco solar acoplado a um “*Tracker 2AP*” para medir somente a radiação solar proveniente de outras direções, que não a direção do feixe solar;
- *Two Axis Positioner – 2AP (Kipp&Zonen)* – é um rastreador da posição do Sol de dois eixos que tem como finalidade ocultar os raios solares diretos para a realização das medidas de irradiação solar difusa e de radiação de onda longa; e também manter o pireliômetro direcionado para o Sol para coleta da radiação de incidência normal.
- Pireliômetro NIP (*Eppley Laboratory, Inc*) – trata-se de equipamento para medida de

irradiância solar de incidência normal que efetua medidas de radiação solar direta em um plano normal à incidência de radiação, através do acompanhamento do sol ao ser acoplado ao “*Tracker2AP*”;

- Pirgeômetro PIR (*Eppley Laboratory, Inc*) – é um radiômetro para medida de irradiação solar na faixa espectral de infravermelho (radiação de onda longa).
- LUX Lite (*Kipp&Zonen*) – efetua medidas de radiação solar na faixa do espectro visível. Os valores são expressos em unidades de iluminância através da simulação da resposta espectral do olho humano à radiação visível;
- PAR Lite (*Kipp&Zonen*) – efetua medidas de radiação PAR – radiação fotossinteticamente ativa;
- Fotômetro Cimel CE (*Cimel Electronique*) – sua principal aplicação é a medida da radiação oriunda do Sol ou do céu utilizando uma combinação de filtros espectrais e um sistema de apontamento com movimento azimutal e zenital para determinação da coluna total de vapor d’água, ozônio e aerossóis;
- Total Sky Imager TSI-440 (*YES, Inc*) – trata-se de um imageador do céu que possui uma câmera colorida CCD invertida apontada para o centro de um espelho convexo que reflete a imagem do céu diretamente para a sua lente. As imagens coletadas a cada 15 minutos são processadas pelo programa *TSI Manager Software* para determinar a fração do céu coberta por nuvens;
- Anemômetro Modelo 05106 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas da velocidade horizontal e da direção do vento de 0 a 60 m/s, resistindo a rajadas de até 100 m/s;
- Barômetro PTB 101 (*Vaisala*) – efetua medidas da pressão atmosférica na faixa de 600 a 1060 mbar através de um sensor capacitivo;
- Sensor de Temperatura do ar Model 41342 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas da temperatura do ar através de um sensor de temperatura de platina;
- Sensor de Temperatura do ar/Umidade do ar Model 41372 (*R. M. Young Company*) – efetua medidas de temperatura e umidade relativa do ar através de um sensor de umidade de alta precisão.
- Datalogger CR23X Micrologger (*Campbell Scientific*) - converte os sinais dos dados coletados em números que representam a grandeza da variável medida, seja ela radiação, temperatura ou umidade, posteriormente os armazena em uma memória de 4MB.



### **2.3. Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – LRER/CRS/CCR/INPE - MCT**

O Laboratório de Recursos de Energias Renováveis (LRER) foi criado pelo Dr. Nelson Jorge Schuch em 2003, e está instalado no Prédio Sede do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, junto ao campus da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, na cidade de Santa Maria, RS.

O LRER é responsável pelos estudos e pesquisas científicas realizadas referentes aos recursos de energias renováveis, com ênfase em energia solar e eólica. O Laboratório possui uma parceria com o Projeto SONDA a qual propicia a formação de recursos humanos e o desenvolvimento de pesquisas cujos resultados veem sendo apresentados tanto em eventos científicos nacionais como internacionais.

## CAPÍTULO 3

### ENERGIA EÓLICA

#### 3.1. Histórico da Energia Eólica

Os primeiros registros do aproveitamento da força dos ventos pelo homem têm data bastante imprecisa, mas certamente ocorreu há milhares de anos no Oriente. Estima-se que a partir da Idade Média, o homem passou a utilizar em maior escala as forças aerodinâmicas de sustentação, permitindo as grandes navegações e também maior eficiência às máquinas eólicas (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

Possivelmente, as máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI (Eldridge, F.R., 1980). O certo é que no século XIV, na Holanda, essas máquinas já apresentavam grande evolução técnica e de capacidade em potência e ampla aplicação como fonte de energia, principalmente em moagem de grãos, serrarias e bombeamento d'água. A Figura 3.1 apresenta um moinho de vento típico da Holanda. Na época da descoberta do Brasil, em 1500, havia milhares de moinhos de vento em toda a Europa (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).



Figura 3.1. Moinho de vento típico da Holanda. Fonte: CRESESB, 2008.



Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram a sua aplicação grandemente expandida na Europa: na fabricação de papel para atender à demanda após a invenção da imprensa, na produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem (Eldridge, F. R., 1980). No entanto, com a expansão do uso de máquinas a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

A geração eólica de eletricidade teve início na década de 1930, nos Estados Unidos, onde cataventos multipás eram conectados a pequenos geradores de corrente contínua, que serviam simplesmente para carregar baterias, favorecendo o acesso à energia elétrica no meio rural. Em meados da década de 1940, teve início o aproveitamento eólico-elétrico em grande escala (AWEA, 2001).

A geração de eletricidade em grande escala, para alimentar de forma complementar o sistema elétrico com o uso de turbinas eólicas de grande porte, é tecnologia que existe há diversas décadas. Desde a fase experimental, ressaltam-se os primeiros aproveitamentos eólico-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos e na Dinamarca (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001). Na Alemanha, em 1955, Hütter desenvolveu o precursor dos atuais aerogeradores (com controle de passo, pás de materiais compostos e torre tubular esbelta) que, nos dias de hoje, atingem uma capacidade individual da ordem de alguns megawatts, tornando possível a construção de usinas eólicas suficientemente grandes e eficazes para serem consideradas uma alternativa viável para complementar as matrizes energéticas em todo o mundo (AWEA, 2002).

Na década de 1970 e até meados da década de 1980, após a primeira grande crise do petróleo, diversos países, inclusive o Brasil, despenderam esforços em pesquisa sobre a utilização da energia eólica para a geração de eletricidade.

Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólico-elétrico atingiu a escala de contribuição mais significativa, em termos de geração e economicidade (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001). Dinamarca é atualmente o país que apresenta a maior contribuição de energia eólica em sua matriz energética e é o maior fabricante mundial de turbinas eólicas (G.M. Joselin Herbert et al., 2007).

A evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo e a evolução tecnológica dos aerogeradores entre 1980 e 2002 podem ser observados nas Figura 3.2 a-b. A capacidade instalada total mundial de aerogeradores voltados à produção de energia



elétrica atingiu 74223 MW ao final de 2006, apresentando um crescimento de mais de 20% em relação a 2005.

O Brasil totalizou a inserção de 921 MW de capacidade instalada ao fim de 2010 (Martins e Pereira, 2011). Esse acréscimo deve-se em grande parte à instalação dos parques eólicos no estado do Rio Grande do Sul e estados do Nordeste do Brasil. O complexo eólico de Osório conta com 75 aerogeradores de 2 MW cada um, instalados em três parques eólicos, com capacidade de produzir 417 GWh por ano (Martins, F.R. et al., 2007).

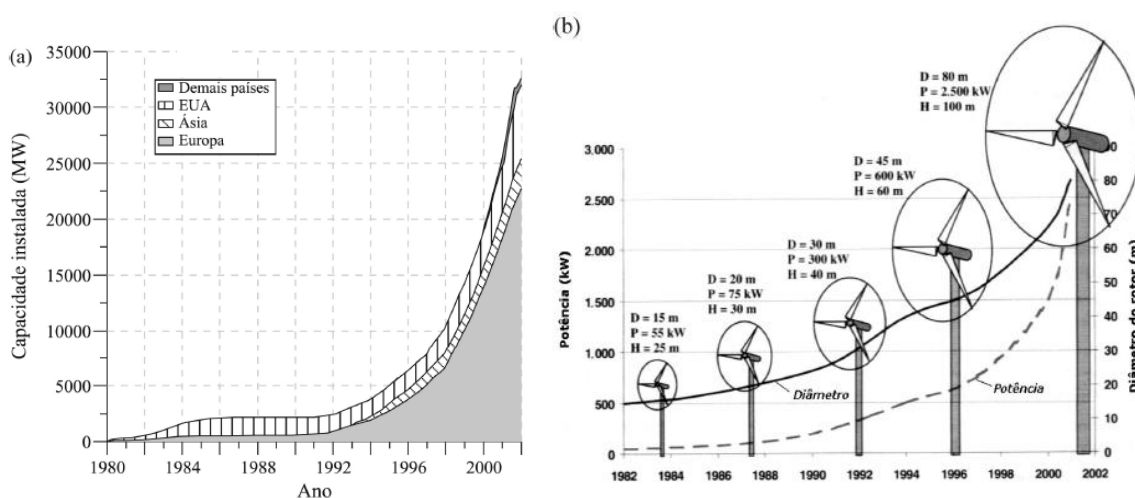


Figura 3.2.(a) Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo. (b)Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1980 e 2002.Fonte: Gasche Twele, 2002.

### 3.2. Panorama da Energia Eólica

Os ventos se caracterizam por serem uma fonte de energia limpa, renovável e disponível em todos os lugares. Essa fonte energética traz grandes vantagens para o meio ambiente e para a saúde humana, pois não gera emissões de gases tóxicos e de material particulado, não contamina a água e diminui a queima de combustíveis fósseis (Amêndola, 2007).

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m. Mesmo assim, estima-se que o potencial eólico bruto mundial

seja da ordem de 500.000 TWh por ano. Devido, porém, a restrições socioambientais, apenas 53.000 TWh (cerca de 10%) são considerados tecnicamente aproveitáveis. Ainda assim, esse potencial líquido corresponde a cerca de quatro vezes o consumo mundial de eletricidade.

O Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) é uma organização não governamental estabelecida em 2005 que associa as indústrias e estudiosos de energia eólica em nível internacional. Tal conselho estipulou meta para que, em 2020, 12% da eletricidade consumida no mundo seja de fonte eólica (1250 GW, que gerariam 3000 TWh em 2020) (EWEA, 2004).

O Conselho Europeu de Energia Renovável (European Renewable Energy Council – EREC), associação que congrega outras associações de energia renovável na Europa, traçou meta para as fontes renováveis. O estudo aponta que em 2022 a fonte eólica poderia atingir um nível de 4000 TWh ao ano, quando superaria a fonte hidráulica como a principal fonte renovável de eletricidade no mundo.

Para ambas as entidades, o avanço de penetração da energia eólica na matriz energética mundial seria uma reprise de desempenho demonstrado pela fonte nuclear e hidráulica nas últimas 4 décadas. A Figura 3.3 traz os prognósticos do EREC, que congrega a indústria de equipamentos e serviços do setor de energia renovável (EREC, 2004).

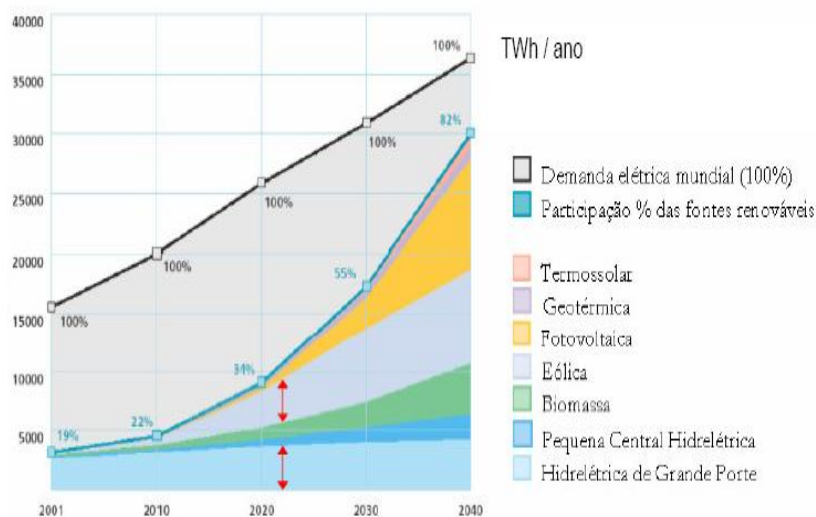


Figura 3.3. Prognóstico para o crescimento das fontes renováveis na matriz elétrica mundial. Fonte: EREC, 2004.

### 3.3. Potencial Eólico Brasileiro

O Brasil tem histórico dirigido à energia renovável, sendo líder mundial do setor,

porém atravessa um momento crítico na oferta de energia para um desenvolvimento sustentado (Viterbo, J.C., 2008).

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW (energia eólica). A Figura 3.4 apresenta um mapa da velocidade média dos ventos a altura de 50 metros no Território Brasileiro.

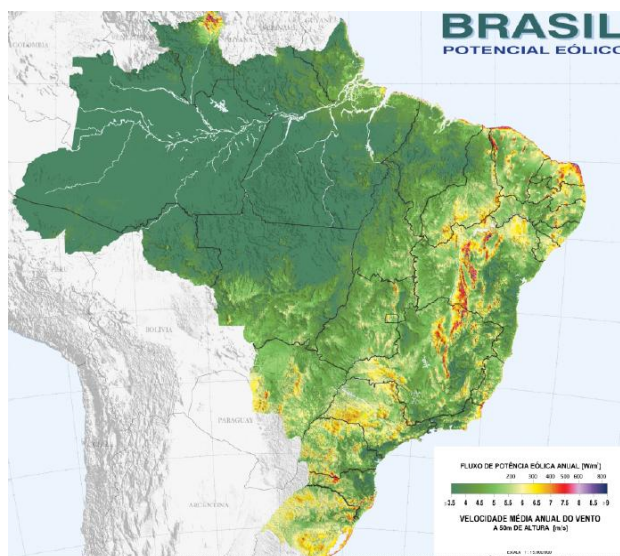


Figura 3.4. Velocidade média do vento a altura de 50 metros no Território Brasileiro. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

### 3.4. Potencial eólico do Rio Grande do Sul

No escoamento atmosférico sobre o Rio Grande do Sul, prevalecem os efeitos ditados pela dinâmica entre o anticiclone subtropical Atlântico, os intermitentes deslocamentos de massas polares e a depressão barométrica do nordeste da Argentina.

O anticiclone subtropical Atlântico é um centro de altas pressões cuja posição média anual é próxima a 30° S e 25° O. A circulação atmosférica dele resultante, no sentido anti-horário, resulta no predomínio de ventos de leste-nordeste sobre toda a área do Brasil situada abaixo da latitude 10° S.

A depressão barométrica do nordeste da Argentina é uma área quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária a leste dos Andes, cuja posição anual média é de aproximadamente em 29°S e 66°O. Essa depressão é causada pelo bloqueio da circulação

geral atmosférica imposto pela parede montanhosa dos Andes e acentuada pelo intenso aquecimento das planícies de baixa altitude da região.

O gradiente de pressão atmosférica entre a depressão do nordeste da Argentina e o anticiclone subtropical Atlântico induz um escoamento persistente de leste-nordeste ao longo de toda a região Sul do Brasil.

Além dos regimes predominantes do vento, é muito importante o efeito do caráter dinâmico das circulações sobre o Rio Grande do Sul, em especial as intermitentes passagens de frentes frias, que se intensificam no Inverno e na Primavera, trazendo o célebre Minuano – vento forte, frio e cortante que sopra de SW sobre a Campanha, com duração aproximada de três dias a cada passagem de massa polar. Apesar de não ser predominante, o Minuano agrega uma contribuição importante ao potencial eólico do Rio Grande do Sul.

A Figura 3.5 apresenta uma representação da velocidade média anual dos ventos a 50 metros de altura no Estado do Rio Grande do Sul.

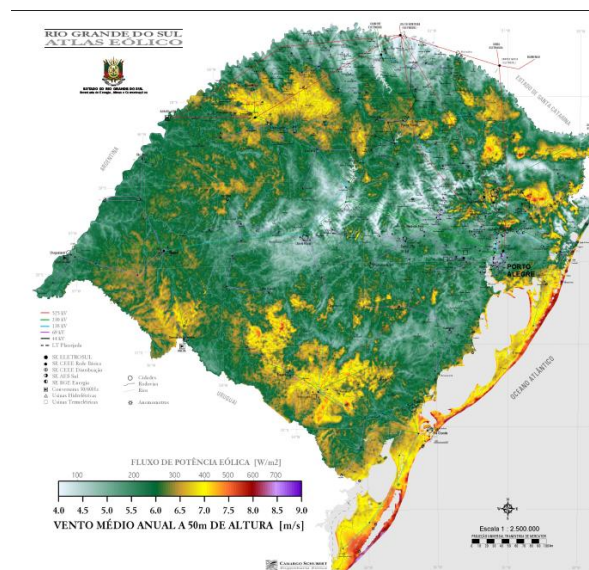


Figura 3.5. Vento médio anual a 50 metros de altura no Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Eólico: Rio Grande do Sul, 2002.

## CAPÍTULO 4

### VENTO

#### 4.1. O Vento – Características gerais

O vento consiste na circulação de ar na atmosfera oriunda da energia solar. A radiação provoca um aquecimento diferencial das 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 vertical – para cima e para baixo. Embora o comportamento vertical seja importante, principalmente para o processo de formação das nuvens, a 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 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).

##### 4.1.1. 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 em relação ao 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  $\Delta n$ ,  $\Delta s$  e  $\Delta z$ , como ilustra a Figura 4.1. 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 a 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  $\Delta n$  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  $\Delta n$ , pode-se escrever:

$$\Delta p = \frac{\partial p}{\partial n} \Delta n \quad (4.1)$$

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

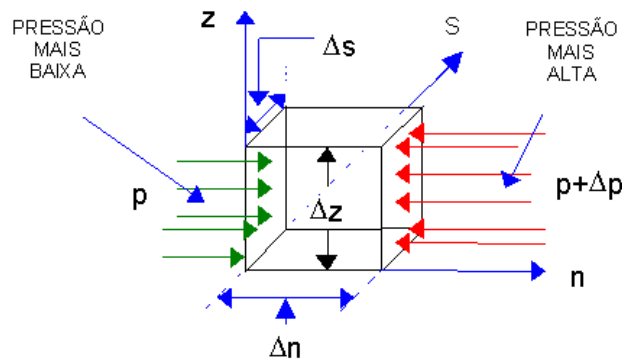


Figura 4.1. Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido. Fonte: Grimm, 1999..

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

$$F_n = -\frac{\partial p}{\partial n} \Delta n \Delta s \Delta z \quad (4.2)$$

O sinal negativo na equação 4.2 indica que a força resultante aponta no sentido negativo do eixo n, ou seja, da pressão mais alta para a pressão mais baixa. Dividindo-se pela massa do bloco,  $\rho\Delta n\Delta s\Delta z$ , onde  $\rho$  é a densidade do ar, obtém-se a componente n da força de gradiente de pressão por massa unitária:

$$F_{pn} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (4.3)$$

Quando um gradiente de pressão  $\partial p/\partial n$  se desenvolve, o ar tende a se mover das regiões de pressões mais altas para as de pressões mais baixas, de maneira a eliminar este gradiente. Sendo assim, o gradiente horizontal de pressão é a força geradora dos ventos. As forças de Coriolis e de Atrito atuam em função da existência do movimento de forma que atuam sobre os ventos para modificar o movimento, mas não para produzi-lo.

#### 4.1.2. 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 4.2, que, devido à rotação da Terra sobre seu eixo, constitui-se em 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.

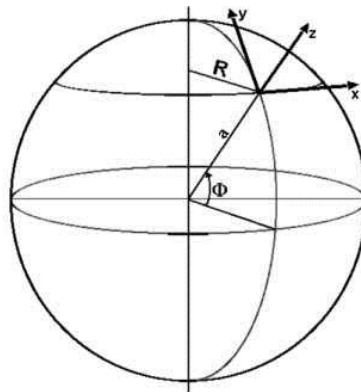


Figura 4.2. Sistema de coordenadas fixo à Terra (Sistema não-inercial). Fonte: Grimm, 1999.

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. 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 terrestre, 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  $\Omega = 2\pi$  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  $\Omega R$  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:

$$\frac{(\Omega R + u)^2}{R} \quad (4.4)$$

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, de acordo com a 2ª Lei de Newton, aplicada pelo observador inercial:

$$\quad (4.5)$$

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 ( $\Omega$ ), da velocidade do objeto em movimento ( $u$ ) e da latitude ( $\phi$ ), de acordo com a Figura 4.3. Essas componentes são calculadas através das seguintes equações:

na direção horizontal  $-2\Omega u \sin\phi$  (4.6)

e na direção vertical  $2\Omega u \cos\phi$  (4.7)



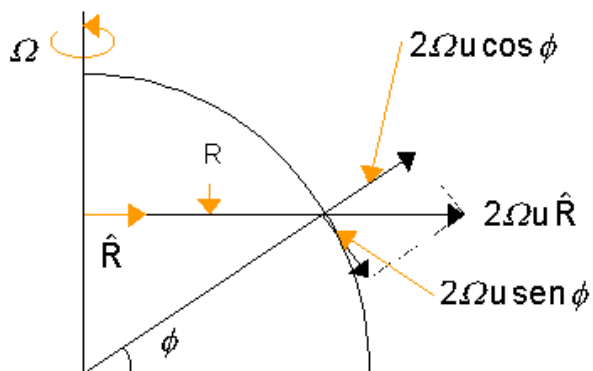


Figura 4.3. Componentes da Força de Coriolis. Fonte: Grimm, 1999.

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

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. Considerando um deslocamento no sentido polo Norte - equador, observa-se que ocorre um desvio para a direita do percurso, devido à rotação anti-horária do Hemisfério Norte, visto do espaço conforme ilustra a Figura 4.4.

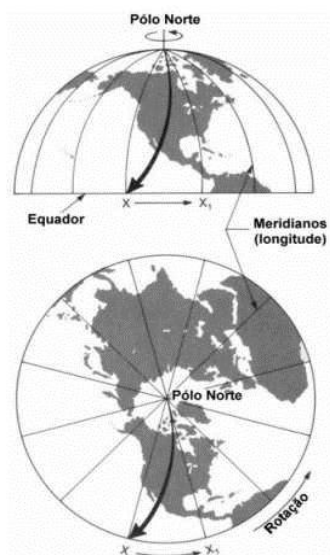


Figura 4.4. O Efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul. Fonte: Grimm, 1999.

Para um deslocamento de ar no sentido oeste – leste, a força de Coriolis depende da latitude. De acordo com as Equações 4.6 e 4.7, a força de Coriolis, será nula no equador e máxima nos polos, conforme se pode visualizar na Figura 4.5.

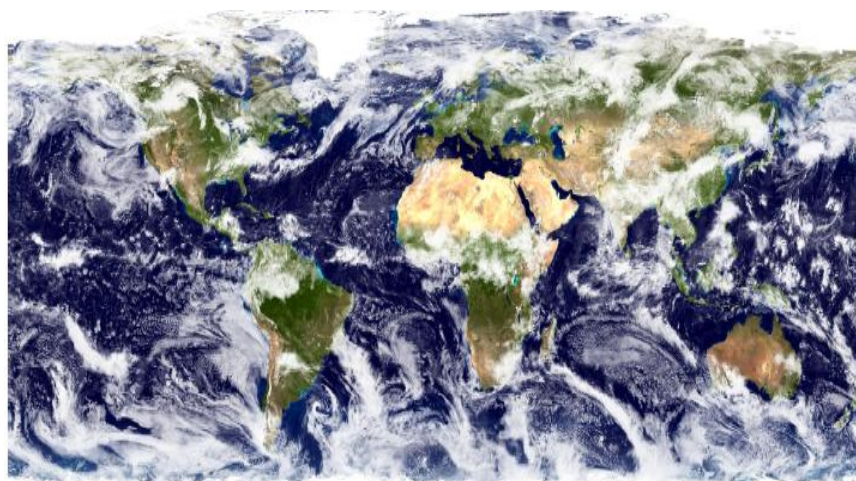


Figura 4.5. Evidência do efeito da força de Coriolis em função da latitude.

Fonte: Amêndola, 2007.

#### 4.1.3. Força de Atrito

A terceira força que atua sobre os ventos tem o efeito de reduzir o movimento do ar. A força de atrito tem influência apenas nas camadas próximas à superfície e pode ser considerada insignificante em grandes alturas acima do nível do solo.

### 4.2. O Vento Geostrófico

O vento geostrófico é um vento horizontal, não acelerado, que sopra ao longo de trajetórias retilíneas, resultante de um equilíbrio entre a força de 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.

Como o equilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis é atingido é apresentado na Figura 4.6. 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

possuir uma velocidade constante, paralela às isóbaras. Diz-se que foi atingido o balanço geostrófico.



Figura 4.6. O vento geostrófico no Hemisfério Sul. Fonte: Grimm, 1999.

Na atmosfera real, os ventos nunca são puramente geostróficos. Contudo, a importância deste vento idealizado está no fato de que ele fornece uma aproximação útil dos ventos superiores reais. Assim, medindo-se o campo de pressão em ar superior, os meteorologistas podem determinar a direção e a velocidade do vento, pois a direção é paralela às isóbaras e a velocidade só depende do espaçamento entre elas.

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.

### 4.3. Ventos na Camada de Atrito

Os ventos na camada de atrito podem apresentar direção e velocidade diferentes dos ventos globais. Estas diferenças se devem à proximidade da superfície terrestre, onde o fluxo de ar sofre a influência local da temperatura, rugosidade e obstáculos (Amêndola, 2007).

O atrito é importante apenas nos primeiros quilômetros da atmosfera mais próximos à 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 4.7.

O ângulo de cruzamento dependerá da magnitude do atrito: em torno de  $10^\circ$  sobre os oceanos, onde há menos atrito, até  $45^\circ$  sobre terreno rugoso.

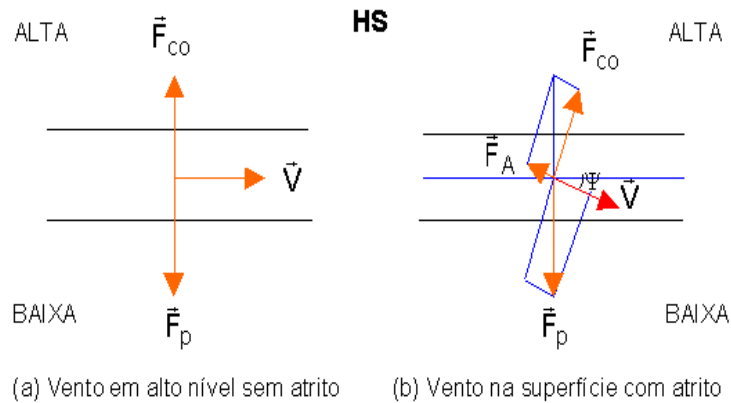


Figura 4.7. Efeito do atrito sobre o vento. Fonte: Grimm, 1999.

#### 4.4. Circulação global idealizada

Uma das primeiras contribuições ao modelo clássico de circulação geral é de George Hadley, em 1735. Hadley estava ciente de que a energia solar impulsionava os ventos. Propôs que o enorme gradiente de temperatura existente entre os pólos e o equador cria uma circulação térmica. O aquecimento desigual da Terra faria o ar se mover para equilibrar as desigualdades. Hadley sugeriu que sobre a Terra sem rotação o movimento do ar teria a forma de uma grande célula de convecção em cada hemisfério, conforme a Figura 4.8.

O ar equatorial mais aquecido subiria e se deslocaria para os polos. Eventualmente esta corrente em alto nível atingiria os polos, onde ela desceria, se espalharia na superfície e retornaria ao Equador. Quando o ar polar se aproximasse do Equador, se aqueceria e subiria novamente. Portanto, a circulação proposta por Hadley para uma Terra sem rotação tem ar superior indo para os polos e ar na superfície indo para o Equador.

Na década de 1920, foi proposto um sistema de três células de circulação em cada hemisfério para a tarefa de manter o balanço de calor na Terra. A Figura 4.9 ilustra este modelo e os ventos resultantes na superfície.

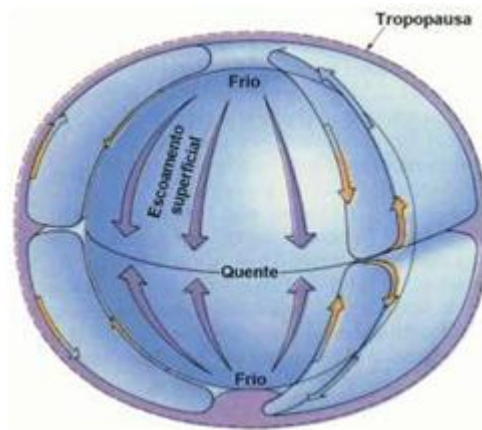


Figura 4.8. Circulação global numa Terra sem rotação (Hadley). Fonte: Grimm, 1999.

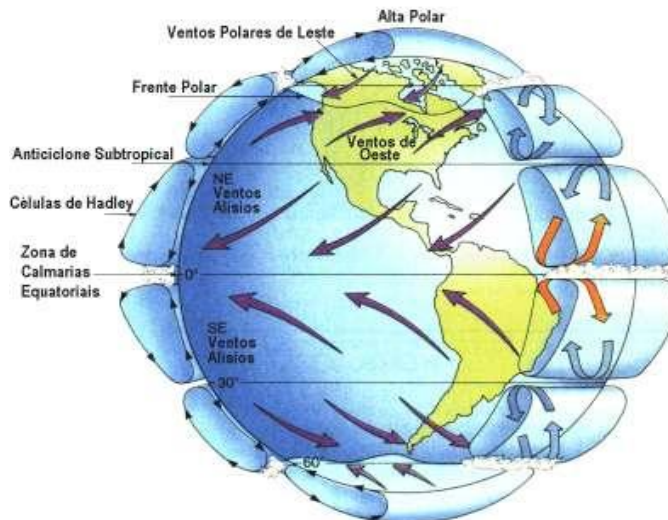


Figura 4.9. Circulação global idealizada no modelo de circulação de três células. Fonte: Grimm, 1999.

Na zona entre o Equador e aproximadamente 30° de latitude, a circulação se dirige para o Equador na superfície e para os polos em nível superior, formando a chamada célula de Hadley. Acredita-se que o ar quente ascendente no Equador, libera calor latente na formação de nuvens cumulus profundas fornecendo a energia necessária para alimentar esta célula. Estas nuvens também fornecem a precipitação que mantém as florestas tropicais.

Quando a circulação em alto nível se dirige para os polos, ela começa a subsidiar numa região entre 20° e 35° de latitude. O ar subsidente é relativamente seco, pois perdeu sua umidade próxima ao Equador. Além disso, o aquecimento adiabático durante a descida reduz ainda mais a umidade relativa do ar. Consequentemente, esta zona de subsidência é a zona em

que se situam os desertos tropicais. Os ventos são geralmente fracos e variáveis próximos das zonas de subsidência, que configuram zonas de alta pressão subtropicais, no Hemisfério Norte e no Hemisfério Sul.

Do centro dessas zonas de alta pressão, a corrente na superfície se divide num ramo que segue em direção aos polos e num ramo que segue para o Equador. O vento em direção ao Equador é desviado pela força de Coriolis, adquirindo uma componente para oeste, formando os ventos alísios. No HN, os alísios vêm de nordeste e no HS de sudeste. Eles se encontram próximos ao equador, numa região de fraco gradiente de pressão, que constitui a zona de baixa pressão equatorial.

No modelo, a circulação entre 30° e 60° de latitude é oposta à da célula de Hadley. A corrente na superfície é para os polos e, devido à força de Coriolis, os ventos têm uma forte componente de oeste, formando os ventos de oeste em latitudes médias, que são mais variáveis que os ventos alísios. Examinando o modelo de três células na Figura 4.9, pode-se perceber que a circulação em latitudes médias é dirigida para o Equador e, portanto, a força de Coriolis produziria um vento de leste.

A circulação em altas latitudes é pouco conhecida. Acredita-se que a subsidência nas proximidades dos polos produz uma corrente superficial em direção ao equador, que é desviada, formando os ventos polares de leste, em ambos os hemisférios. Quando estes frios ventos polares se movem para o equador, eles eventualmente encontram a corrente de oeste de latitudes médias, que é mais quente. A região na qual estas duas correntes se encontram é uma região de descontinuidade, chamada frente polar.

#### **4.5. Medição do Vento**

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

Os principais aparelhos para medição do vento são:

- Cata-vento tipo Wild;
- Anemômetro de conchas;
- Anemômetro de hélices.

No catavento tipo Wild, ilustrado na Figura 4.10, a direção é dada por uma haste



horizontal orientada por um par de aletas em relação a quatro hastes fixas que indicam os pontos cardeais. As aletas também mantêm a placa de medição da velocidade do vento sempre perpendicular à direção do vento. A velocidade é obtida a partir da flexão de uma placa retangular móvel em relação à vertical, sob a ação do vento. A deflexão é medida sobre uma escala de 7 pinos colocados sobre um arco de metal. O cata-vento é instalado a 6 m de altura.

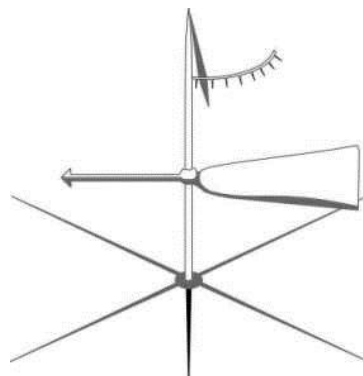


Figura 4.10. Catavento tipo Wild. Fonte: Grimm, 1999.

O anemômetro de conchas pode ser entendido como um pequeno rotor eólico com eixo de rotação vertical; ao eixo são fixados braços que sustentam conchas como na Figura 4.11. 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. As principais vantagens deste equipamento são a robustez e o custo, que fazem com que este medidor seja o mais utilizado em nível mundial.

O anemômetro de hélices 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. Este medidor de velocidade pode ser do tipo leme simples mostrado na Figura 4.12, duplo ou formado por um conjunto de três hélices posicionadas em eixos ortogonais. A principal vantagem deste instrumento é a possibilidade de medição da direção do vento via leme junto com a medição da velocidade do vento.

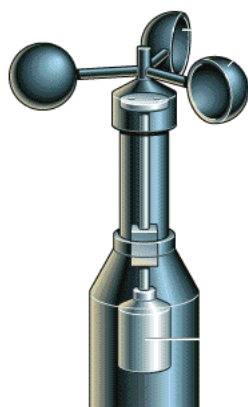


Figura 4.11. Anemômetro de conchas. Fonte: Rincondelvago, 2009.

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 4.12. Anemômetro de hélice. Fonte: Campbellsci, 2009.

Todos os anemômetros utilizados para o levantamento de recursos eólicos ou para uso em turbinas devem ser calibrados com frequência anual. Calibrações que fornecem certificados padronizados são adequadas para propósitos de energia eólica, pois cada instrumento deve possuir certificado de calibração próprio (Carvalho, P., 2003).



## CAPÍTULO 5

### AEROGERADORES

#### 5.1. 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). Como o ar possui uma massa e se move em forma de vento, pode-se calcular a sua energia cinética, através da seguinte equação:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (5.1)$$

onde  $E$  é a energia cinética (joules),  $m$  a massa do ar (Kg) e  $v$  a velocidade do vento (m/s).

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

$$P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \quad (5.2)$$

onde  $P$  é a potência disponível no vento (W),  $t$  o tempo (s) e  $\dot{m}$  a taxa de variação de massa (Kg/s).

Quando uma massa de ar passa através de uma área  $A$  em um determinado intervalo de tempo, conforme ilustrado na Figura 5.1, a taxa de variação de massa é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v \quad (5.3)$$

onde  $\rho$  é a densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>) e  $A$  a área de varredura (m<sup>2</sup>).

Substituindo (5.3) em (5.2), tem-se a equação da potência disponível no vento.

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5.4)$$

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.

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, M.O.L., 1998):

$$P_{\text{Max}} = \frac{1}{2} \rho A C_{p,Betz} v^3 \quad (5.5)$$

Onde  $C_{p,Betz}$  é o coeficiente de Potência de Betz, que vale aproximadamente 0,593.

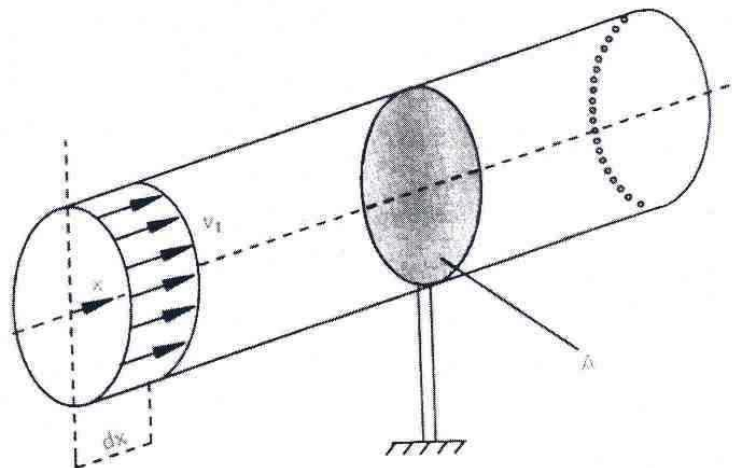


Figura 5.1. Variação da massa através da área de varredura. Fonte: Marques, 2004.

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, P., 2003).

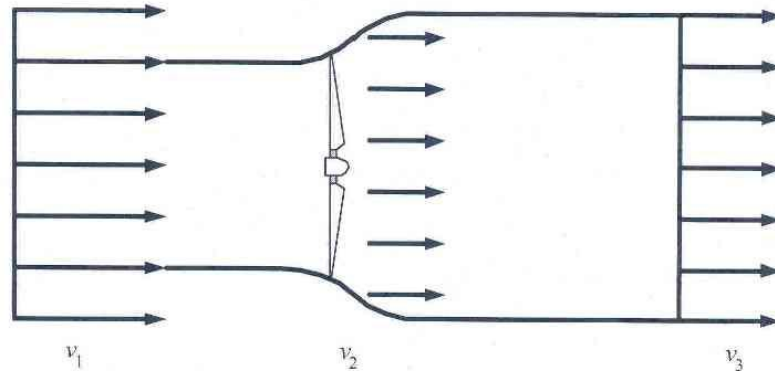


Figura 5.2. Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina. Fonte: Marques, 2004.

O coeficiente de potência é função da chamada velocidade específica  $\lambda$  que representa a relação entre a velocidade de rotação da ponta da pá,  $v_u$ , e a velocidade do vento:

$$\lambda = \frac{v_u}{v} \quad (5.6)$$

Na realidade,  $\lambda$  não se trata de uma velocidade, mas sim de um número adimensional. A relação entre  $c_p$  e  $\lambda$  mostra que para apenas um valor de velocidade específica, o coeficiente de potência é máximo, conforme representado na Figura 5.3 (Carvalho, P., 2003).

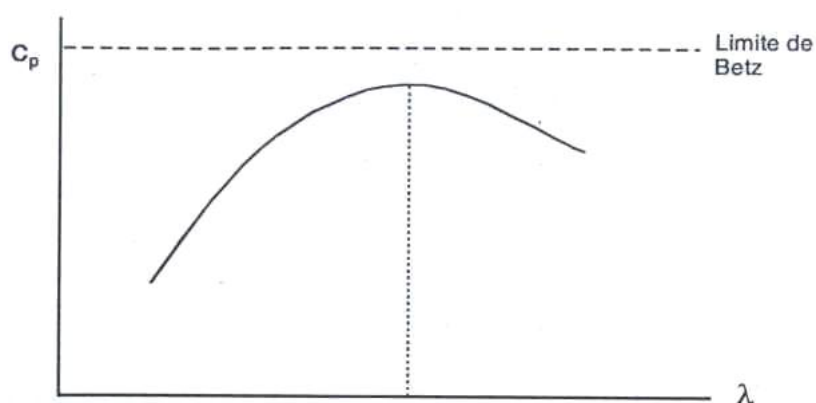


Figura 5.3. Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica. Fonte: Carvalho, 2003.

O dimensionamento e a quantidade de pás do aerogerador estão diretamente relacionados com a velocidade específica ( $\lambda$ ). A Figura 5.4 mostra que quanto menor o valor de  $\lambda$ , maior é o número de pás, pois existe a necessidade de uma varredura mais sólida.

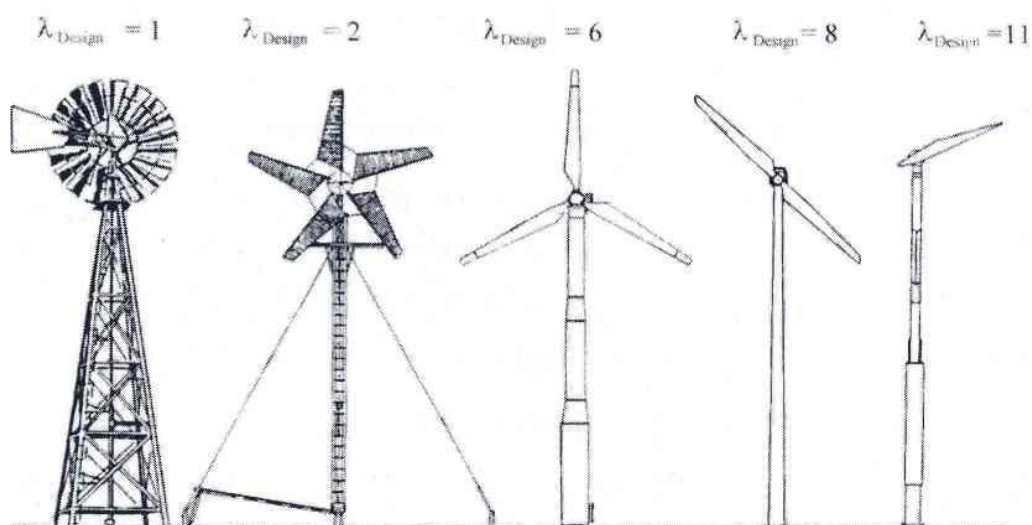


Figura 5.4. Velocidade Específica para diferentes tipos de turbinas eólicas. Fonte: Marques, 2004.

## 5.2. Principais Componentes de um Aerogerador

Os principais componentes de um aerogerador moderno de acordo com Amêndola (2007) são apresentados na Figura 5.5:

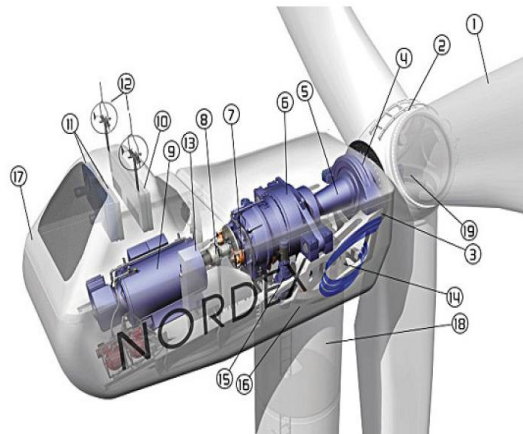


Figura 5.5. Principais componentes de um Aerogerador. Fonte: Amêndola, 2007.

Os principais componentes de um aerogerador, enumerados na Figura 5.5 são:

- Pás da turbina – De maneira geral, captam a energia cinética do vento e a convertem em conjugado mecânico.
- Cubo da turbina – Peça robusta, feita de ferro fundido, que une as pás em torno do eixo da turbina.
- Carcaça da Nacele – É a estrutura da nacela que deve ser rígida e dúctil para suportar, respectivamente, todos os esforços mecânicos e absorver as vibrações típicas.
- Rolamento do Eixo da Turbina – Rolamento com duas carreiras de esferas (ou roletes), instalados em um mancal de mesmo material da carcaça da nacela.
- Eixo da turbina – Transmite o conjugado motor da turbina eólica para a transmissão e, por trabalhar sob baixa rotação e conjugado elevado, possui um diâmetro relativamente grande.
- Caixa de Transmissão – É uma caixa de engrenagens, geralmente com dois estágios do tipo planetário, que amplia a baixa velocidade de rotação do eixo da turbina para valores compatíveis com a do eixo do gerador.
- Freio do Eixo do Gerador – Freio mecânico a disco, instalado no eixo de saída da transmissão, que é acionado em situações de emergência e manutenção, quando, muitas vezes, é auxiliado por um pino de segurança para travar o eixo da turbina.
- Acoplamento entre Transmissão e Gerador – Para não ocorrerem tensões mecânicas desnecessárias nos mancais de rolamento do gerador e da transmissão, seus eixos são conectados por meio de um acoplamento flexível.
- Gerador – Converte o conjugado mecânico fornecido pela turbina em energia elétrica,

podendo ser de vários tipos e apresentar diversas configurações de instalação.

- Radiador de Calor da Transmissão – Componente do sistema de refrigeração da caixa de transmissão.
- Radiador de Calor do Gerador – Componente do sistema de refrigeração do gerador.
- Sensores de Direção e Velocidade do Vento – Para o correto funcionamento, os valores destas variáveis de interesse devem ser fornecidos aos respectivos sistemas de controle.
- Sistema de Controle – Proporciona uma operação totalmente automática, faz a monitoração de diversas variáveis de interesse de todo o aerogerador e, por telemetria, permite sua monitoração remota, tanto de seus parâmetros quanto da rede elétrica a que estão conectados.
- Sistema Hidráulico – É o sistema que mantém e controla a pressão do óleo utilizado nos freios do eixo do gerador e da posição da nacele.
- Sistema de Posicionamento da Nacele – Este sistema deve manter a turbina de frente com o vento, ou seja, manter o plano que contém as suas pás em uma posição normal à direção do deslocamento do fluxo de ar.
- Rolamento da Nacele – Instalado entre a nacele e a torre, permite a sua rotação em torno do eixo longitudinal da torre.
- Carenagem da Nacele – Moldada em materiais compostos, é fixada sobre a estrutura da nacele para proteger os equipamentos da intempérie e para proporcionar um acabamento aerodinâmico.
- Torre – De formato tubular levemente cônico e construída em aço ou concreto, deve sustentar a nacele e a turbina em uma altura adequada, sob qualquer condição de vento.
- Sistema de Controle do Ângulo de Passo da Turbina – As turbinas mais modernas permitem a rotação das pás em torno do seu eixo longitudinal e, juntamente com um sistema de controle adequado, o controle ativo do ângulo de passo da turbina.

### **5.3. 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 5.6. Na Figura 5.6, pode-se verificar que existem diferentes comportamentos na potência gerada para diferentes intervalos de velocidades do vento, definindo diferentes modos ou regiões de operação.

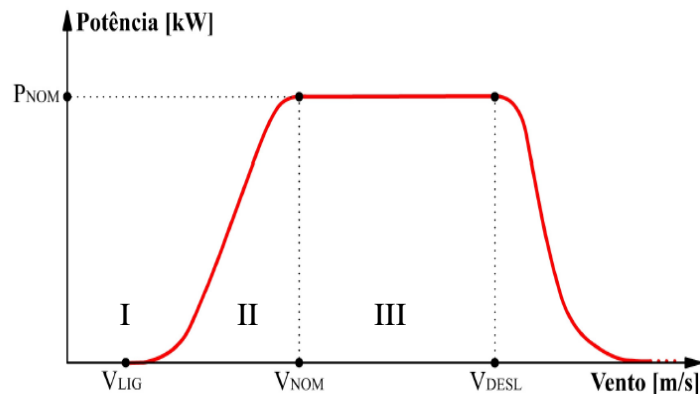


Figura 5.6. Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador. Fonte: Amêndola, 2007.

A região I da Figura 5.6 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 ao equipamento e estrutura, sendo essa velocidade limite chamada de “velocidade de corte” (Marques, J., 2004).

## CAPÍTULO 6

### AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS DE VENTOS

#### 6.1. Distribuição de frequências dos dados eólicos

Uma das primeiras etapas de qualquer projeto para geração de energia elétrica requer o levantamento da produção de energia futura, ou seja, a determinação do potencial disponível. Por exemplo, em uma hidrelétrica, esse potencial é obtido através da quantidade de água que será armazenada. Nos sistemas eólicos, o potencial 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 avaliar o aproveitamento da energia eólica e muitas estações de medida estão localizadas perto de cidades, de maneira que essas informações são úteis apenas para aplicações meteorológicas, podendo apresentar inconsistências 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.

Uma das características do vento é o seu comportamento intermitente ao longo do tempo, devido a isso é comum o uso de funções estatísticas a fim de delimitar esse comportamento. Em circunstância em que a variação do vento é lenta e gradual, o uso de distribuições estatística do tipo densidade de probabilidade é utilizado. Segundo Castro (2008), resultados apontados por densidade de probabilidade apresentam grande valor quando são descritos de forma analítica.

Para a realização do 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. A Figura 6.1 ilustra um exemplo de histograma construído com dados de ventos coletados por anemômetros na costa do Ceará a 50 metros de altitude.





Figura 6.1.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 5.6) do gerador eólico a ser utilizado e da distribuição estatística da velocidade do vento no local da instalação (histograma da Figura 6.1), a produção total de energia elétrica pode ser estimada através da equação (Gasch, R., 1996):

$$E_{\text{Total}} = \sum_{v_i} f_i P_i \quad (6.1)$$

onde 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, W.J., 1981):

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (6.2)$$

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

Outro aspecto importante é o período de medição da velocidade do vento, quanto maior o período, maior a confiança nas informações obtidas. Através de longas séries de

medições de alta qualidade podem ser verificados importantes aspectos, como a variação sazonal, anual e interanual da velocidade do vento. De modo geral, recomenda-se a medição de dados eólicos de um determinado local por um período de no mínimo um ano.

É importante salientar que erros no levantamento do histograma de frequência da velocidade do vento, além de influenciarem negativamente na 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.

Conforme descrito anteriormente, é importante descrever o histograma da velocidade do vento através de uma função de distribuição de frequência (Gasch, R., 1996).

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

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{v_{med}^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_{med}}\right)^2} \quad (6.3)$$

onde  $v_{med}$  representa a velocidade média do vento, dada por:

$$v_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (6.4)$$

Uma das vantagens dessa 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, permitindo, dessa forma, 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 6.2 mostra um histograma de frequência aproximado por uma distribuição de Rayleigh.

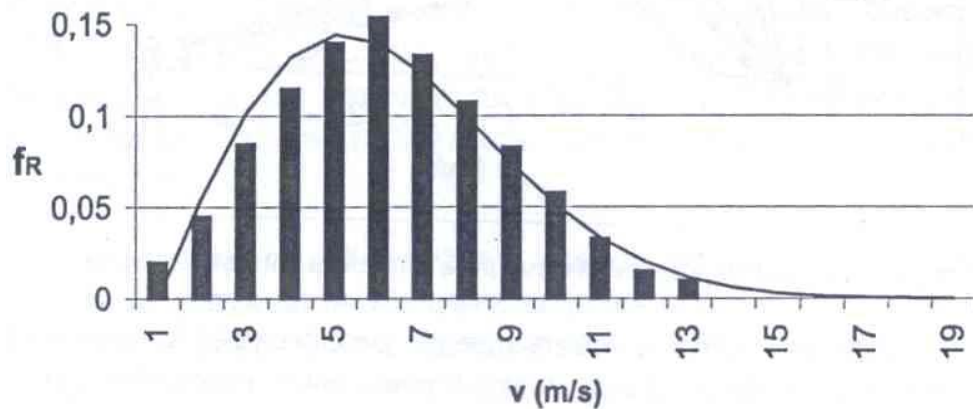


Figura 6.2. Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh. Fonte: Carvalho, 2003.

Outra função bastante utilizada é a distribuição de Weibull, que constitui uma generalização da distribuição de Rayleigh e pode ser aplicada nos casos em que os dados não se ajustem à distribuição anterior (Carvalho, P., 2003).

A distribuição de Weibull é calculada através de:

$$f_W(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (6.5)$$

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 6.3. Para o caso específico de  $k = 2$ , tem-se a distribuição de Rayleigh.

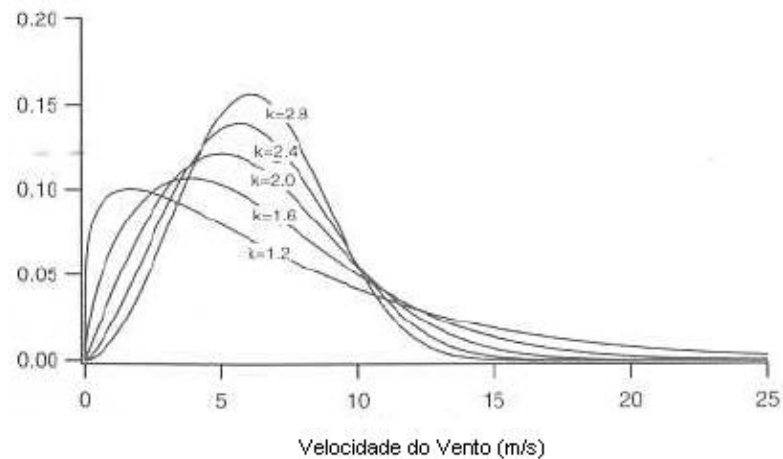


Figura 6.3. Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Manwell, et al., 2002.

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

$$S = \frac{\sigma}{v_{med}} \quad (6.6)$$

onde  $\sigma$  representa o desvio padrão da velocidade do vento, dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v - v_{med})^2 dt} \quad (6.7)$$

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

Apesar das funções de Rayleigh e Weibull serem as principais funções usadas pelo setor eólico, existem outras funções que podem se adequar tão bem ou até melhor ao perfil de uma região. Portanto, a análise de outras funções é importante para traçar o melhor perfil da variabilidade dos ventos de uma região.

## 6.2. Comprimento de Rugosidade

Nos níveis atmosféricos mais baixos, as aproximações de vento geostrófico e de vento

gradiente não podem mais ser aplicadas devido a modificações no equilíbrio de forças promovidas pelo atrito fornecido pela superfície. O relevo e a presença de obstáculos moldam o escoamento do ar sobre a superfície terrestre, bem como geram turbulências no fluxo. A rugosidade da superfície é a propriedade física que descreve a ação da superfície terrestre na redução do momento e na absorção do impacto dos ventos (Martins, F.R. et al., 2007).

Define-se a camada limite atmosférica como a região compreendida entre a superfície e uma altura variável entre 100 e 3000 metros de altura e que apresenta um comportamento diferente do restante da atmosfera devido às interações superfície-atmosfera (R.B. Stull, 1988).

A rugosidade da superfície ocasiona a redução da velocidade do ar e, portanto, da intensidade da força de Coriolis, já que esta é proporcional ao módulo da velocidade. Outro aspecto importante a ser considerado é o cisalhamento do vento. A velocidade do vento é nula a alturas próximas à superfície e aproximadamente geostrófica na atmosfera livre. Na camada superficial, observa-se um perfil vertical aproximadamente logarítmico do módulo da velocidade do vento, como apresentado graficamente na Figura 6.4 (Martins, F.R. et al., 2007).

Prandtl desenvolveu a seguinte expressão logarítmica empírica para a variação da velocidade do vento em uma camada limite turbulenta (Gasch, R., 2002).

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (6.8)$$

onde a variação da velocidade com a altura vertical  $z$  é dada em função da velocidade de fricção ( $v^*$ ), da constante de von Karmán ( $k$ ) e do comprimento de rugosidade. O comprimento de rugosidade corresponde à altura em que o vento, próximo à superfície, assume valor zero e depende do relevo e obstáculos da superfície. Contudo, o perfil real de velocidades na vertical depende também da estratificação da temperatura e pressão na atmosfera.

A velocidade do vento em uma altura qualquer pode também ser estimada através da Equação 6.9

$$v(z) = v_{ref} \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad (6.9)$$

onde  $h_{ref}$  representa uma altura de referência de medição de velocidade do vento (em geral 10 ou 30 metros),  $v_{ref}$ , a velocidade do vento medida nesta mesma altura de referência e  $z_0$ , o comprimento de rugosidade.

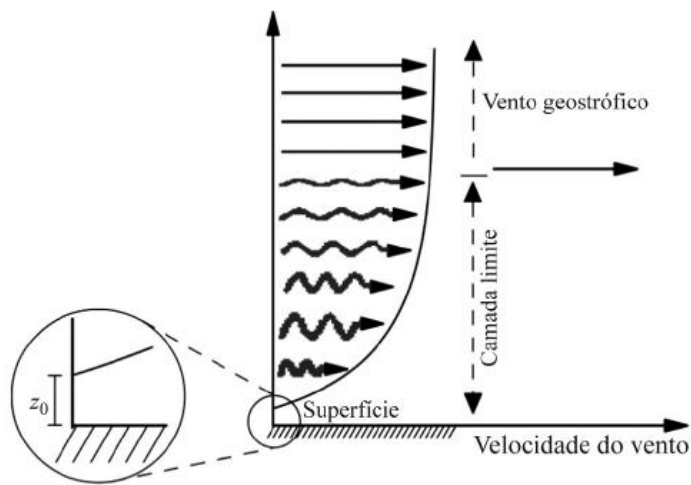


Figura 6.4. Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) é a altura na qual a velocidade é nula. Fonte: Martins, F.R. et al., 2007.

A Lei de Potência é um modelo semelhante que representa o perfil da velocidade do vento:

$$v(z) = v_{ref} \left( \frac{z}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (6.10)$$

onde  $\alpha$  é chamado de expoente de camada limite e varia em função da rugosidade da superfície. Para terrenos planos, cobertos com capim, pode ser aplicado  $\alpha$  aproximadamente igual a 0,14. As superfícies típicas podem ser divididas em classes de acordo com a Tabela 6.1. A lei de potência varia com parâmetros como altura, tempo do dia, estação, terreno,

temperatura, vento, etc. Uma correlação com este modelo e o comprimento de rugosidade é determinada por (Manwillet al., 2002):

$$\text{[Ilustração de um perfil de rugosidade com ondas e edifícios]} \quad (6.11)$$

Tabela 6.1. Classificação da rugosidade de superfícies típicas. Fonte: Krohn, S., 2001.

Classe	Z <sub>0</sub> [m]	Descrição
0,0	0,0002	Superfície da água.
0,5	0,0024	Terrenos completamente abertos com superfície lisas tais como: Pistas de aeroportos. Grama ceifada. etc.
1,0	0,03	Áreas rurais abertas, sem cercas, sem sebes, com edificações bastante espaçadas e colinas suaves.
1,5	0,055	Áreas rurais com algumas casas, com sebes de até 8[m] a uma distância de aproximadamente 1250[m].
2,0	0,1	Áreas rurais com algumas casas, com sebes de até 8[m] a uma distância de aproximadamente 500[m].
2,5	0,2	Áreas rurais com muitas casas, com arbustos ou sebes de até 8[m] a uma distância de aproximadamente 250[m].
3,0	0,4	Pequenas cidades, vilas, áreas rurais com muitas sebes, vegetação nativa, sebes muito altas, terreno muito acidentado e desigual.
3,5	0,8	Grandes cidades com prédios altos.
4,0	1,6	Cidades muito grandes com prédios muito altos.



Figura 6.5. Modelo de rugosidade sobreposto ao relevo sombreado. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

## CAPÍTULO 7

### ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

#### 7.1. Manutenção dos equipamentos da estação SONDA – SMS

Uma rotina de manutenção tem como principal objetivo reduzir ou evitar a perda de dados e do desempenho dos equipamentos, visto que é de extrema importância a obtenção de dados com alto grau de confiabilidade. A partir de visitas periódicas realizadas pelos participantes do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis visa-se a conservação física dos sensores resultando numa baixa probabilidade de falhas.

Durante as visitas são feitas a coleta de dados de cobertura de nuvens, troca das sílicas gel dos equipamentos, limpeza dos domos dos sensores, limpeza e polimento do imageador, verificação do nivelamento dos equipamentos e limpeza do pluviômetro.

A sílica gel tem a finalidade de manter a umidade relativa do ar no interior dos medidores eletromagnéticos tão baixo quanto possível, visto que o acúmulo excessivo de umidade dentro desses equipamentos pode causar arcos elétricos no seu interior danificando seus componentes. As gotículas de água que se condensam no interior do instrumento são capazes de mudar a impedância e a frequência características do sensor, o que dificulta a transmissão correta do sinal. Por esse motivo, os equipamentos apresentamem seu corpo pequenos compartimentos contendo sílica gel, os quais são trocados periodicamente evitando que sua coloração da sílica mude, pois isso indica que a sílica tem absorvido umidade. O material úmido coletado é colocado em uma estufa para secagem para posterior reaproveitamento.

A limpeza dos domos de quartzo dos sensores e da lente da câmera CCD do imageador é realizada com papel umedecido ou flâmula visando à eliminação de sujeiras presente nos domos, uma vez que a presença de sujeira ocasiona absorção de radiação e, portanto os valores de radiação seriam inferiores aos valores reais.

A limpeza e polimento da calota do imageador, visualizado na Figura 7.1, são realizados com o uso de flâmula contendo líquido específico para limpeza de vidros e outra contendo cera automotiva para o polimento. Esse procedimento é importante para não ocorra interferências na imagem refletida à câmara ou até mesmo a presença de sujeiras que possam vir a ser confundidas como nuvens no momento em que o equipamento determina a cobertura



de nuvens do céu em cada imagem.



Figura 7.1. Imageador Total Sky Imager TSI-440 (YES, Inc) instalado na estação SONDA – SMS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.

## 7.2. Coleta, Redução e Análise dos Dados da estação SONDA – SMS

Os equipamentos da estação SONDA – SMS estão conectados a um Datalogger CR23X Micrologger (Campbell Sci.), que armazena os dados solares, meteorológicos e eólicos coletados pelos sensores instalados na estação. Um diagrama com a configuração local dos equipamentos da estação é apresentado na Figura 7.2.

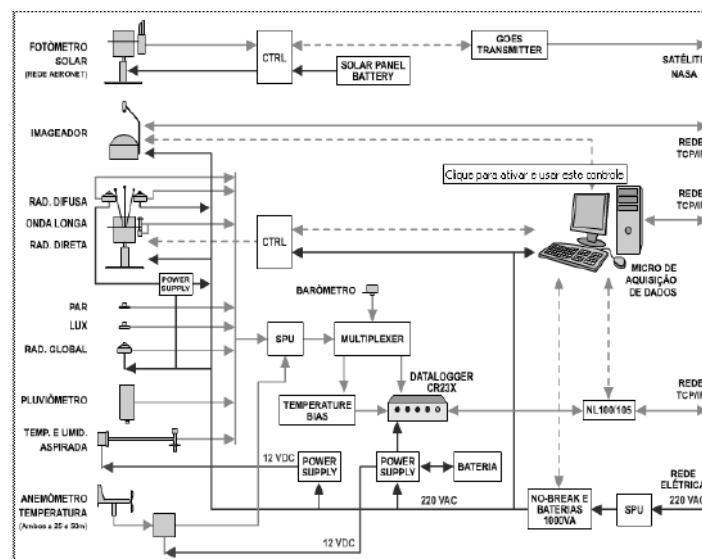


Figura 7.2. Diagrama da configuração local dos equipamentos instalados na estação SONDA – SMS. Fonte: SONDA, 2011.

Os sensores solarimétricos da estação SONDA - SMS realizam uma medida a cada segundo. Esses dados são armazenados pelo Datalogger, que fornece, como dados de saída, os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão das medidas para cada minuto, o que fornece 1440 medidas diárias. Diferenciadamente, os dados coletados pelos anemômetros, que coletam as medidas de velocidade e direção do vento, e os sensores de temperatura nas alturas de 25 e 50 metros realizam medições a cada 10 minutos, fornecendo 144 medidas diárias.

Os dados do Datalogger, localizado no interior do Prédio 1 do OES/CRS/CCR/INPE – MCT são repassados a cada hora ao computador PC SONDA, encontrado no mesmo local. Estes dados são acessados pela Internet através do software TeamViewer, copiados e salvos nos computadores do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis no Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE – MCT, em Santa Maria, RS.

Os dados do Imageador de nuvens Total Sky Imager TSI-440 (YES, Inc), no entanto, representam um volume muito grande e por esta razão são armazenados no computador PC SONDA e copiados em dispositivos de memória Flash nas ocasiões de visita ao OES, sendo posteriormente salvos nos computadores do LRER/CRS/CCR/INPE – MCT.

Os dados do Imageador e dos demais sensores constituem o banco de dados brutos. Os valores médios das medidas de cada minuto são separados em planilhas diárias para cada equipamento, que por sua vez são agrupadas em meses e anos, constituindo os dados reduzidos.

Os dados solarimétricos são plotados temporalmente ao longo do dia em softwares gráficos e, através da integração da área sob a curva obtida, são determinados os valores das integrais diárias das medidas (quantidade total de energia incidente durante o período de um dia). Já os dados eólicos, recebem tratamento estatístico característico após serem reduzidos.

### **7.3. Troca e manutenção do fotômetro Cimel**

Recentemente foi instalado o fotômetro Cimel no Observatório Espacial do Sul junto à estação SONDA-SMS em parceria com a rede AERONET (AERosol ROBotic NETwork). A rede AERONET, distribuída por todo o globo, tem como finalidade criar uma base de dados de profundidade ótica dos aerossóis e água precipitável para validação dos dados de satélite e pesquisas e caracterização dos aerossóis.

O fotômetro é um equipamento que precisa ser constantemente recalibrado. Porém a calibração é feita pela própria AERONET, portanto é necessário desmontar e enviar o

equipamento instalado e receber e instalar outro a fim de não parar de coletar as medidas.

No mês de junho de 2011 foi recebido um novo fotômetro calibrado, o qual foi instalado no OES, porém ao ligar o equipamento, este não funcionou de acordo como esperado. O novo fotômetro, assim como o anterior, deveria seguir e apontar para o sol para a coleta de dados, porém o novo equipamento apontava para direções diferentes das esperadas. Para solucionar o problema foram consultados os engenheiros do LIM/CPTEC que colaboram com a rede SONDA, que indicaram alguns testes para definir o problema presente. No momento, ainda não foi encontrado a solução para o problema, porém novos testes estão sendo realizados pelos colaboradores do LRER.

#### **7.4. Participação de eventos com apresentação de Trabalhos**

Como resultado do trabalho desenvolvido durante este primeiro semestre como aluno de Iniciação Científica do programa PIBIC/INPE, o acadêmico participou de 9 trabalhos científicos publicados sendo 5 como autor e 4 como co-autor:

*Estudo do comportamento estatístico dos ventos para a Região Central do Rio Grande do Sul. Alexandre Ceretta Dalla Favera; Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Márcio Ceconi; Eduardo Weide Luiz; Enio Bueno Pereira.* Trabalho apresentado no I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil realizada nos dias 13 a 16 de Setembro de 2010 em Florianópolis – SC.

*Aerosol Optical Thickness Influence Over the Photosynthetically Active Radiation (PAR) in Earth Surface. Alexandre Ceretta Dalla Favera; Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Márcio Ceconi; Eduardo Weide Luiz; Enio Bueno Pereira.* Trabalho apresentado no AGU - The Meeting of the Americas realizada nos dias 8 a 12 de Agosto de 2010 em Foz do Iguaçu – PR.

*Avaliação do Potencial Eólico do Sul do Brasil - SICINPE 2010. Alexandre Ceretta Dalla Favera; Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Enio Bueno Pereira.* Trabalho apresentado no 25º Jornada Acadêmica Integrada (JAI) da UFSM realizada nos dias 9 e 12 de Novembro de 2010 em Santa Maria – RS.

*Análise do Comportamento Estatístico Anual e Sazonal dos Ventos para a Região*

***Central do Rio Grande do Sul. Alexandre Ceretta Dalla Favera;*** Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Márcio Ceconi; Eduardo Weide Luiz; Enio Bueno Pereira. Trabalho apresentado no XXIV Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia – CRICTE realizada nos dias 29 de Setembro à 1º de Outubro de 2010 em Rio Grande – RS.

***Análise Comparativa da Influência da Nebulosidade em Dados de Irradiação Solar Direta no Observatório Espacial do Sul.*** Eduardo Weide Luiz; Nelson Jorge Schuch; Fernando Ramos Martins; Márcio Ceconi; **Alexandre Ceretta Dalla Favera.** Trabalho apresentado no I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil realizada nos dias 13 a 16 de Setembro de 2010 em Florianópolis – SC.

***Emprego de Modelo Parametrizado para Estimativa de Irradiância Solar Direta em Superfície na Ausência de Nuvens.*** Márcio Ceconi; Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Eduardo Weide Luiz; **Alexandre Ceretta Dalla Favera.** Trabalho apresentado no I Congresso de Iniciação Científica e Pós-Graduação - Sul Brasil realizada nos dias 13 a 16 de Setembro de 2010 em Florianópolis – SC.

***Numerical Modelling of the Influence of Cloudiness and Relative Humidity on Surface Solar Irradiation.*** Eduardo Weide Luiz; Nelson Jorge Schuch; Fernando Ramos Martins; Márcio Ceconi; **Alexandre Ceretta Dalla Favera.** Trabalho apresentado no AGU - The Meeting of the Americas realizada nos dias 8 a 12 de Agosto de 2010 em Foz do Iguaçu – PR.

***Avaliação do Potencial Solar do Sul do Brasil - SICINPE 2010.*** Márcio Ceconi; Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Eduardo Weide Luiz; **Alexandre Ceretta Dalla Favera.** Trabalho apresentado no 25º Jornada Acadêmica Integrada (JAI) da UFSM realizada nos dias 9 e 12 de Novembro de 2010 em Santa Maria – RS.

***Avaliação Do Potencial Eólico Do Sul Do Brasil.*** **Alexandre Ceretta Dalla Favera;** Fernando Ramos Martins; Nelson Jorge Schuch; Enio Bueno Pereira. Trabalho apresentado Simpósio de Iniciação Científica do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais, 2011, Santa Maria, RS. 2011.

## CAPÍTULO 8

### METODOLOGIA APLICADA AOS DADOS DE VENTO

#### 8.1. Obtenção dos dados de ventos

Três anemômetros da “R. M. Young Company”, acoplados nas alturas de 10, 25 e 50 metros na torre anemométrica apresentada na Figura 2.5 instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS, são responsáveis por registrar os dados de velocidade e direção horizontais dos ventos. Estes anemômetros foram originalmente desenvolvidos para utilização em boias marítimas, dessa forma possuem alta resistência à corrosão, a impacto e as intempéries, porém leves e precisos.

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

O anemômetro, mostrado na Figura 8.1, é instalado sobre uma haste vertical que o mantém afastado 1,5 metros em relação à torre eólica, como mostrado na Figura 8.2. 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.

Junto a cada anemômetro está instalado o “*Wind Line Driver Model 05631B*” um acessório da “R. M. Young Company” responsável por converter os sinais brutos de velocidade e direção do vento produzidos pelo anemômetro em um sinal de corrente elétrica de 4 a 20 mA.



Figura 8.1. Anemômetro R. M. Young modelo 05106. Fonte: Campbellsci, 2009.



Figura 8.2. Equipamento de medida de dados eólicos da estação SONDA – SMS, instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.

## **8.2. Estudo comparativo entre as distribuições estatísticas que melhor se adequam ao perfil dos ventos para a estação SONDA – SMS**

A base de dados utilizados neste estudo compreende o período de Janeiro de 2005 a Janeiro de 2011, abrangendo 309.716 dados coletados pelo anemômetro instalado na altura 50 metros na estação SONDA - SMS.

Realizou-se um estudo comparativo com três diferentes funções de densidade estatística: Rayleigh, Weibull e Log Normal visando analisar qual dentre elas representam melhor o comportamento dos ventos para a região Central do Rio Grande do Sul.

A função de densidade de probabilidade de Rayleigh é dada pela Equação 6.3:

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{v_{med}^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_{med}}\right)^2} \quad (6.3)$$

onde  $f_R(v)$  é a frequência de ocorrência de cada velocidade horizontal  $v$  do vento;  $v_{med}$  é velocidade média.

A função de densidade de probabilidade  $f(x)$  de Weibull é dada pela Equação 6.5:

$$f_W(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (6.5)$$

onde  $f_W(v)$  é a frequência de ocorrência de cada velocidade horizontal  $v$  do vento;  $k$  é o parâmetro de forma e  $A$  é parâmetro de escala. Os parâmetros de forma ( $k$ ) e escala ( $A$ ) foram obtidos a partir do software WASP® (Wind Atlas Analysis and Application Program).

A função de densidade de probabilidade Log Normal é dada pela Equação 8.1:

$$f_{LG}(v) = \frac{1}{v\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln v - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8.1)$$

onde  $f_{LG}(v)$  é a frequência de ocorrência de cada velocidade horizontal  $v$  do vento;  $\mu$  é o parâmetro de posição e  $\sigma$  é o parâmetro de escala. Os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  são respectivamente média e o desvio padrão dos logaritmos naturais de  $v$ . Obtidos a partir do cálculo das equações 8.2 e 8.3 respectivamente:

$$\mu = \ln v_{med} - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{VAR(v)}{v_{med}^2}\right) \quad (8.2)$$

$$\sigma^2 = \ln \left(1 + \frac{VAR(v)}{v_{med}^2}\right) \quad (8.3)$$

onde  $v_{med}$  é velocidade média e  $VAR(v)$  é a variância de  $v$ .

Com intuito de verificar a adaptação das distribuições estatísticas propostas com as medidas coletadas em campo foi realizada a etapa de validação através do cálculo dos desvios estatísticos MBE (Mean Bias Error) e RMSE (Root Mean Square Error). Outro método de avaliação utilizado foi a correlação entre os dados medidos e os estimados pelas distribuições de Rayleigh, Weibull e Log Normal. O desvio MBE, calculado pela Equação (8.4), indica o desvio médio dos valores estimados pelos modelos em relação aos valores medidos, enquanto

que o RMSE, obtido através da Equação (8.5), representa uma medida da dispersão dos valores estimados em torno dos valores medidos.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{N} \quad (8.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{N}} \quad (8.5)$$

onde  $y_i$  representa os valores estimados pelas distribuições,  $x_i$  são os valores obtidos pelo anemômetro a 50 metros da Estação SONDA e  $N$  simboliza o número de dados utilizados.

### **8.3. Estudo do comportamento anual e sazonal do regime de ventos**

A base de dados utilizados neste estudo compreende o período de Janeiro de 2005 a Janeiro de 2011 conforme coletados pelos anemômetros instalados nas alturas de 25 e 50 metros na estação SONDA - SMS.

Os dados para cada altura de anemômetro foram agrupados ano a ano e também todos os anos juntos, fazendo uma análise anual do perfil da região. Posteriormente, agruparam-se as medidas de cada anemômetro de modo trimestral, de acordo com as quatro estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera), a fim de se obter o potencial sazonal observando o seu comportamento exclusivamente nas direções predominantes.

Através do aplicativo computacional *WAsP*® (Wind Atlas Analysis and Application Program), foram obtidas o histograma ajustado as funções de distribuição de frequências de Weibull e a rosa dos ventos para os diferentes grupos analisados.

Os valores médios da velocidade do vento e da densidade de potência, bem como os parâmetros da função de Weibull foram comparados nas diferentes análises.

### **8.4. Cálculo do comprimento de rugosidade do local**

Para este estudo utilizou-se dados de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, coletados pelos anemômetros instalados nas alturas de 25 e 50 metros na estação SONDA - SMS.

Isolando-se o comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ) na Equação 6.9:



$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (6.9)$$

Obtém-se a Equação 8.6:

$$z_0 = e^{\frac{v(h) \ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right) - v_{ref} \ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{v_{ref} - v(h)}} \quad (8.6)$$

A Equação 8.6 pode então ser empregada para calcular diretamente o valor do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) do local, utilizando como altura ( $h_{ref}$ ) e velocidade ( $v_{ref}$ ) de referência a 25 metros e na velocidade ( $v$ ) e altura ( $h$ ) baseada na altura de 50 metros.

## CAPÍTULO 9

### RESULTADOS

#### 9.1. Estudo comparativo entre as distribuições estatísticas que melhor se adequam ao perfil dos ventos para a estação SONDA – SMS

Do total de dados de velocidade do vento foram calculados os parâmetros de forma (k) e de escala (A) para a distribuição de Weibull; posição ( $\mu$ ) e escala ( $\sigma$ ) para a distribuição Log Normal; assim como outros parâmetros estatísticos como a velocidade média ( $v_{med}$ ) de 5,31 m/s e desvio padrão dos dados de 2,68 m/s. Nas equações 9.1, 9.2 e 9.3 estão as respectivas equações de Rayleigh, Weibull e Log Normal com seus referentes parâmetros.

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{5,31^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{5,31}\right)^2} \quad (9.1)$$

$$f_W(v) = \frac{2,04}{6} \left(\frac{v}{6}\right)^{2,04-1} e^{-\left(\frac{v}{6}\right)^{2,04}} \quad (9.2)$$

$$f_{LG}(v) = \frac{1}{0,48v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln v - 1,56)^2}{2*0,48^2}} \quad (9.3)$$

Com as frequências calculadas pelas distribuições estatísticas representadas nas equações encontradas para Rayleigh, Weibull e Log Normal realizou-se a etapa de validação através do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE, apresentados na Tabela 9.1. Observa-se que tanto a distribuição de Weibull quanto a de Rayleigh apresentaram boas correlações quadrática, cerca de 95%, e desvios aproximados, tanto MBE, cerca de -0,4% quanto RMSE, cerca de 30%. A distribuição Log Normal vem em sequência, apresentou boa relação, porém apresentou a menor correlação quadrática e maior desvio RMSE.

O mesmo resultado pode ser observado e evidenciado pela Figura 9.1 que mostra a relação dos valores medidos pelos estimados, no qual a distribuição de Weibull e Rayleigh estão mais próxima da função  $y=x$ , o que indica a menor dispersão aos dados medidos e maior correlação com os dados medidos na estação SONDA - SMS.

Tabela 9.1. Validação para as distribuições estatísticas através do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE.

Rayleigh		Weibull		Log Normal	
R	0,972	R	0,974	R	0,955
R <sup>2</sup>	0,944	R <sup>2</sup>	0,949	R <sup>2</sup>	0,912
MBE%	-0,465	MBE%	-0,407	MBE%	-0,040
RMSE%	30,814	RMSE%	29,317	RMSE%	47,460

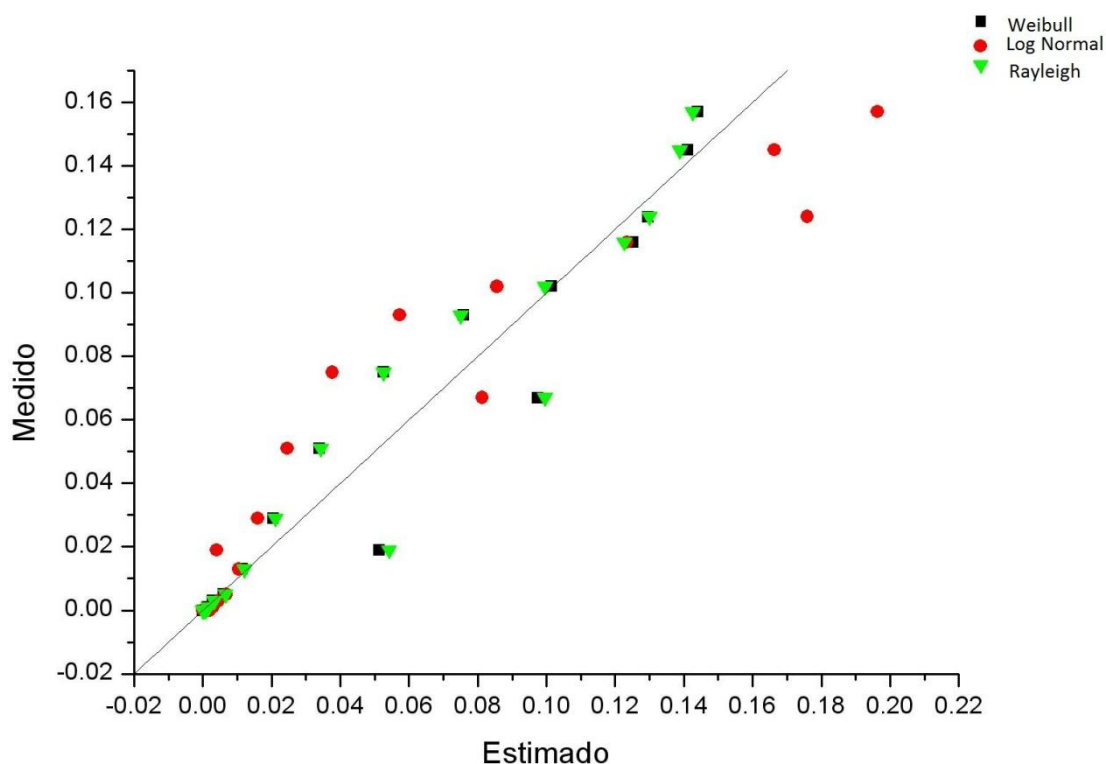


Figura 9.1. Relação entre os dados medidos e os estimados pelas distribuições de Weibull, Log Normal e Rayleigh.

## 9.2. Comportamento anual e sazonal do regime de ventos

As distribuições estatísticas da velocidade dos ventos, representada pela Rosa dos Ventos, juntamente com o histograma ajustado pela distribuição de Weibull para todos os dados observados para as alturas de 25 e 50 m são representadas nas Figuras 9.2 e 9.3.

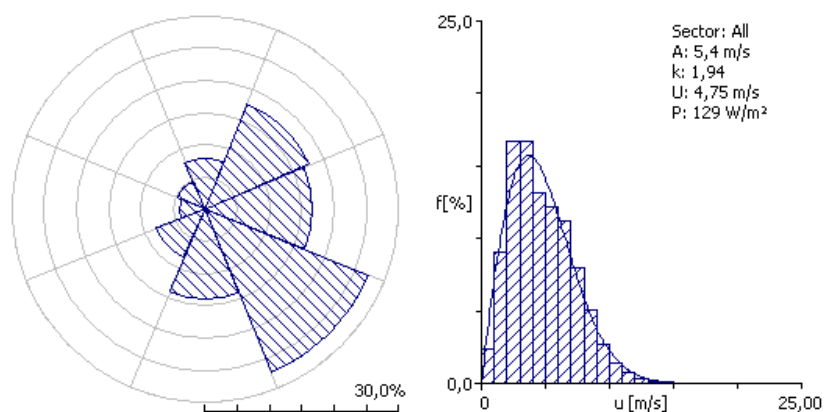


Figura 9.2. Distribuição estatística Anual dos ventos a 25m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.

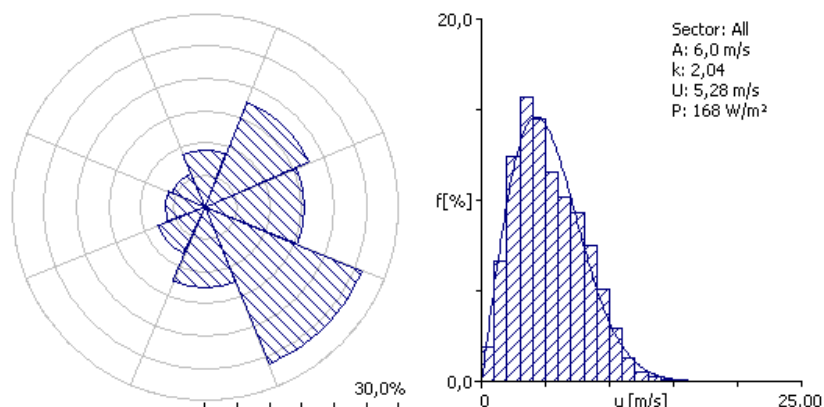


Figura 9.3. Distribuição estatística Anual dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

Observa-se que as direções sudeste (SE) e nordeste (NE) dos ventos são predominantes para as duas alturas. Os valores médios da velocidade dos ventos (U) e de densidade de potência (P) determinados para as diferentes alturas são apresentados na Tabela 9.2 juntamente com os valores do fator de forma k e o fator de escala A calculados pela função de Weibull.

Tabela 9.2. Parâmetros da análise estatística dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

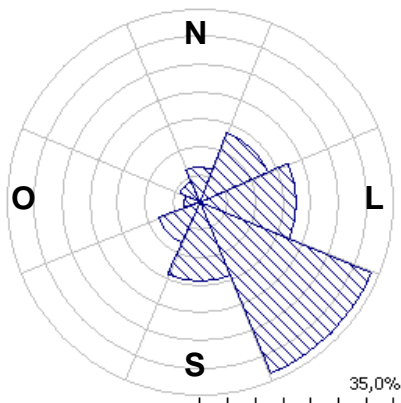
Altura	U (m/s)	P (w/m <sup>2</sup> )	k	A (m/s)
25 m	4,75	129,00	1,94	5,40
50 m	5,28	168,00	2,04	6,00

A análise estatística sazonal dos ventos, referente a cada uma das quatro estações de cada ano agrupadas para as duas alturas tem os seus principais resultados apresentados na Tabela 9.3. Observa-se que tanto a 25 quanto a 50 metros o fator de escala (A) e as velocidades médias (U) apresentam as relações semelhantes na Primavera, Verão e Inverno e abaixo desses valores no Outono. Quando analisado a densidade de potência (P) observam-se as maiores previsões para o Inverno e a Primavera, e os maiores fatores de forma (k) para Primavera e Verão.

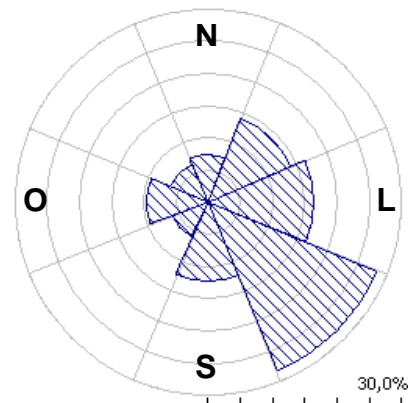
Tabela 9.3. Parâmetros da análise estatística sazonal dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

Altura	Estação	U (m/s)	P (w/m <sup>2</sup> )	k	A (m/s)
25 m	Primavera	<b>5,10</b>	<b>150,00</b>	<b>2,07</b>	<b>5,80</b>
	Verão	<b>4,72</b>	113,00	<b>2,20</b>	<b>5,30</b>
	Outono	4,37	118,00	1,69	4,90
	Inverno	<b>4,74</b>	<b>132,00</b>	1,89	<b>5,30</b>
50 m	Primavera	<b>5,33</b>	<b>169,00</b>	<b>2,10</b>	<b>6,00</b>
	Verão	5,28	151,00	<b>2,31</b>	<b>6,00</b>
	Outono	4,92	146,00	1,92	5,6
	Inverno	<b>5,69</b>	<b>214,00</b>	2,01	<b>6,40</b>

As direções para cada uma das estações do ano para a altura de 50 metros são apresentadas na Figura 9.4. Observa-se que tanto na Primavera e no Verão a direção sudeste (SE) é claramente predominante, porém, o mesmo não ocorre quando analisado o Outono e o Inverno, nos quais há duas direções predominantes, nordeste (NE) e sudeste (SE), que apresentam frequências muito próximas.



Primavera 50 m



Verão 50 m

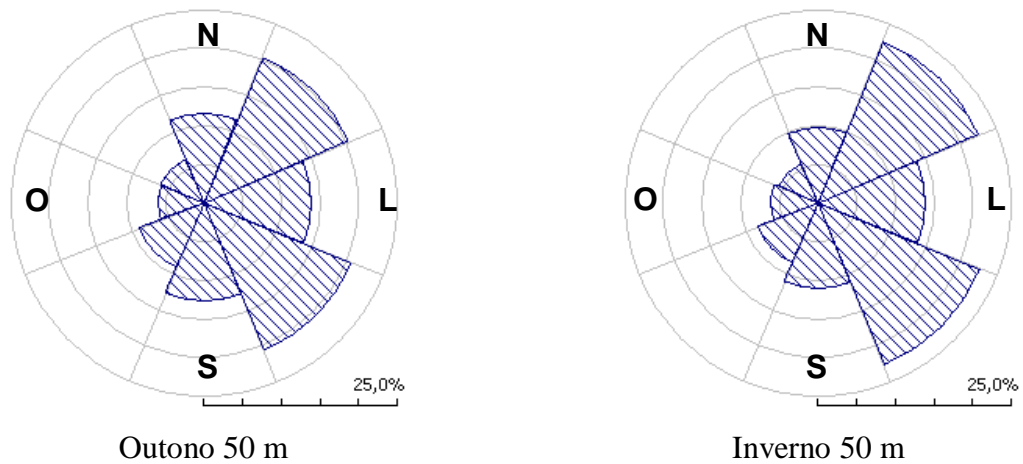


Figura 9.4. Distribuição estatística sazonal dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

Porém de modo geral os ventos foram predominantes na direção sudeste (SE) para as quatro estações tanto a 25 quanto a 50 metros. O perfil sazonal dos ventos nas suas direções predominantes é apresentado na Tabela 9.4. Desta forma, têm-se maiores informações a respeito dos padrões de vento predominantes na região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

Tabela 9.4. Análise estatística sazonal dos ventos em suas direções predominantes a 25 e 50 metros.

Altura	Estação	Direção	Frequência (%)	P (W/m <sup>2</sup> )	k	A (m/s)
25 m	Primavera	SE	33,80	<b>173</b>	<b>2,26</b>	<b>6,20</b>
	Verão	SE	29,90	<b>123</b>	<b>2,58</b>	<b>5,70</b>
	Outono	SE	21,50	95	1,77	4,70
	Inverno	SE	22,80	118	2,04	5,30
50 m	Primavera	SE	33,50	<b>189</b>	<b>2,72</b>	<b>6,70</b>
	Verão	SE	28,20	166	<b>3,00</b>	<b>6,50</b>
	Outono	SE	20,50	109	2,32	5,30
	Inverno	SE	22,60	<b>197</b>	2,26	<b>6,50</b>

### 9.3. Cálculo do comprimento de rugosidade do local

Através da utilização da Equação 8.6, calculou-se o valor do comprimento de rugosidade do terreno na região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCT,



utilizando como referência 25 metros em relação a 50 metros. A média do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) calculado para o período de 2005 a 2010 analisado foi de 1,351 metros. Esse valor, segundo a tabela 6.1 se enquadra para cidades grandes com prédios altos. Este valor é muito elevado para um terreno com vegetação baixa como o do Observatório Espacial do Sul. A causa de uma rugosidade elevada está sendo estudada com o intuito de verificar possíveis problemas de instalação, operação e manutenção dos equipamentos.

## **CAPÍTULO 10**

### **CONCLUSÃO**

Durante o período de atividades do Projeto de Iniciação Científica & Tecnológica, do Programa PIBIC/INPE – CNPq/MCT, o bolsista realizou uma ampla revisão bibliográfica referente ao tema do Projeto com o intuito de desenvolver os tópicos descritos anteriormente.

As três distribuições estatísticas estudadas apresentaram bom ajuste ao perfil dos ventos para o Observatório Espacial do Sul. No entanto a distribuição de Weibull e Rayleigh apresentaram a melhor correlação e os menores desvios. Observa-se que para fatores de forma ( $k$ ) da distribuição de Weibull se aproximam de 2 neste estudo. Quando o fator de forma se iguala a 2, a distribuição de Weibull equivale a distribuição de Rayleigh, o que pode ser observado neste estudo. Os valores de velocidade média ( $U$ ) e fator de escala ( $A$ ) da distribuição estatística de Weibull foram próximos para o Inverno, a Primavera e o Verão. A maior densidade de potência ( $P$ ) foi encontrada na Primavera seguido do Verão nas alturas de 25 e 50 metros, tanto na análise com todas as direções, como na análise de direção predominante.

Observa-se que em todas as estações do ano, Primavera e Verão, Outono e Inverno, a direção sudeste (SE) é predominante, porém para o Outono e o Inverno existem altas frequências de ocorrência de ventos, de mesma proporção, também na direção nordeste (NE).

O comprimento de rugosidade do terreno encontrado mostra um valor muito elevado em relação ao terreno com vegetação baixa, no qual se enquadra o Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra - RS. A causa para esse valor incoerente de rugosidade está sendo analisado a fim de ser corrigido.

A partir do banco de dados de velocidade e direção dos ventos coletados pelos anemômetros instalados na estação SONDA – SMS, em operação no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, foi obtido o perfil preliminar do potencial eólico da região central do Estado do Rio Grande do Sul. No entanto, uma série maior de dados deve ser analisada visando maior segurança a futuros investimentos no setor energético na região.

O conhecimento agregado durante o período de vigência do Projeto permitiu ao bolsista participar de eventos de Iniciação Científica, importantes para divulgar e adquirir novos conhecimentos a respeito do assunto.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amarante, O.C., Brower, M., Zack, J., Sá, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001.
- Amêndola, César Augusto Moreira. **Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso**. São Carlos. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- Atlas eólico: Rio Grande do Sul / elaborado por Odilon A. Camargo [et al.] e editado pela Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC, 2002. 70 p.: il., mapas.
- AWEA – American Wind Energy Association. **The Wind Energy Applications Guide**. Washington, 2001. Disponível em: [http:// www.awea.org](http://www.awea.org).
- AWEA – American Wind Energy Association. **Wind Power is Ready – Clean Energy Technology for Our Economy and Environment**. Washington, 2002. Disponível em: [http:// www.awea.org](http://www.awea.org).
- Campbellsci. Disponível em: <http://www.campbellsci.com>.
- Carvalho, P. **Geração Eólica**. Fortaleza, Imprensa Universitária, 146p. 2003.
- Castro, R. M. G. **Introdução À Energia Eólica, Energias Renováveis E Produção Descentralizada**. Universidade Técnica De Lisboa, 2008. Portugal.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Eólica – Princípios e Tecnologias**, 2008. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_eolica.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.pdf).
- Eldridge, F.R. **Wind machines**. Van Nostrand, 1980.
- EREC, *European Renewable Energy Council*. **Renewable Energy Scenario to 2040**. 2004. pág.11.
- G.M. Joselin Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan and S. Rajapadian, **Renew. Sustain. Energ.** Rev. 11, 1117, 2007.
- Gasch, R. **Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf**. B. G. Teubner, 1996.
- Gasch, R., Twele, J. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation**. Solarpraxis AG, Alemanha, 2002.
- Global Wind Energy Council. **Global Wind Energy Outlook 2006**. Disponível em

- <<http://www.gwec.net/index.php?id=65>>.
- Grimm, A. M. **Notas de Aula de Meteorologia Básica**. Universidade Federal do Paraná, 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acessado em 15 de janeiro de 2010.
  - Hansen, M.O.L. **Basic Rotor Aerodynamics applied to Wind Turbines**. Dept. of Energy Engineering Fluid Mechanics, Technical University of Denmark, 1998.
  - IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. **IPCC WG-I Fourth Assessment Report (AR4) – The Physical Basis on Climate Change – Summary for Policymakers**. Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml)>.
  - Krohn, S. **Danish Wind Turbine Manufactures Association – Guided Tour on Wind Energy**. Copenhagen, 2001. Disponível em: <http://www.windpower.org>.
  - Lutgens, Frederick K., Tarbuck, Edward J. **The Atmosphere: an introduction to Meteorology**. Sixth Edition. New Jersey, Prentice Hall, Inc., 462p. 1995.
  - Manwell, J. F.; Mcgowan, J. G.; Rogers, A. L. **Wind energy explained**. New York: Wiley, 2002. 569 p.
  - 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.
  - Martins, F. R., Guarnieri, R. A., Pereira, E. B., Mantelli, S., Chagas, R. C., Thomaz, C., Andrade, E. **Projeto SONDA - Rede Nacional de Estações para a coleta de dados meteorológicos aplicados ao setor de energia**. In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007, Fortaleza. Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2007.
  - Martins, F. R., Pereira, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, Volume 39, July, 2011.
  - Martins, F.R., Guarnieri, R.A., Pereira, E.B., 2007. **O aproveitamento da energia eólica (The wind energy resource)**. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.30, n.1, 1304, 2008.
  - Pereira, E. B., Martins, F.R., Abreu S. L., Rütther, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, 2006. Disponível em: <[sonda.ccst.inpe.br](http://sonda.ccst.inpe.br)>.
  - Postagem especial: o ciclone extratropical do mês de agosto de 2005. Disponível em:

<[http://www.paulotempo.blogspot.com/2008/05/postagem-especial-o-ciclone\\_31.html](http://www.paulotempo.blogspot.com/2008/05/postagem-especial-o-ciclone_31.html)>;

- R.B. Stull, *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.
- Rincondelvago. Disponível em: <<http://html.rincondelvago.com/pitot.html>>.
- Sansigolo, C. A. **Distribuições De Probabilidade De Velocidade E Potência Do Vento**, Revista Brasileira De Meteorologia, V.20, N.2, 207-214, 2005.
- SONDA, Sistema Nacional de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estações do Projeto SONDA. Disponível em: <[sonda.ccst.inpe.br](http://sonda.ccst.inpe.br)>.
- Stevenson, W. J. **Estatística Aplicada à administração**. Harper & Row do Brasil, 1981.
- The European Wind Energy Association. **Wind Force 12. A Blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2012**. Edition 2004. 104 páginas. Disponível em: <[www.ewea.org](http://www.ewea.org)>.
- Viterbo, Jean Carlo. **Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2008.