



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 Nº 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**  
**CCST/INPE – MCT**  
**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**  
**INPE - MCT**  
**E-mail: fernando.martins@inpe.br**

**Santa Maria, Junho de 2010**



**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO  
PROGRAMA: PIBIC/INPE – CNPq/MCT**

**PROJETO**

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

**PROCESSO: 109639/2008-1**

**Relatório elaborado por ALEXANDRE CERETTA DALLA FAVERA relativo ao período de Agosto de 2009 a Julho de 2010 de execução das atividades:**

**Alexandre Ceretta Dalla Favera - Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT**  
em substituição ao aluno Rodrigo Brackmann  
**E-mail:** alexandreceretta@lacesm.ufsm.br

**Dr. Nelson Jorge Schuch – Co-Orientador**  
**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais - CRS/CCR/INPE – MCT**  
**E-mail:** njschuch@lacesm.ufsm.br

**Dr. Enio Bueno Pereira – Co-Orientador**  
**Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST/INPE – MCT**  
**E-mail:** enio.pereira@cptec.inpe.br

## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

Título: **AValiação do Potencial Eólico do Sul do Brasil**

Processo CNPq N°: 109639/2008-1

### **Bolsista no período de Janeiro/10 a Julho/10:**

**Alexandre Ceretta Dalla Favera**

Curso de Engenharia Química

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Bolsista no período de Agosto/09 a Dezembro/09:**

**Rodrigo Brackmann**

Curso de Engenharia Química

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Orientador:**

**Dr. Fernando Ramos Martins**

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

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – MCT

### **Co-Orientadores:**

**Dr. Nelson Jorge Schuch**

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

**Dr. Enio Bueno Pereira**

Centro de Ciência do Sistema Terrestre - CCST/INPE

### **Colaboradores:**

Engenheiro Químico **Rodrigo Brackmann** – antigo membro do LRER/CRS/CCR/INPE – MCT.

**Márcio Ceconi** – Bolsista I.C. do LRER/CRS/CCR/INPE - MCT e Graduando do curso de Física Bacharelado da UFSM.



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

**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 infraestrutura 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. José Carlos Becceneri e à Sra. Egidia Inácio da Rosa, Secretária do Programa PIBIC/INPE - CNPq/MCT, pelo constante apoio, alertas e sua 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 prestadas ao acadêmico, em especial a Daniel Vinicius Fiorin, Rodrigo Brackmann, Márcio Ceconi e Eduardo Weide Luiz

Por fim, 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

Uma das primeiras etapas de qualquer projeto para geração de energia elétrica requer o levantamento do potencial disponível. O levantamento do potencial eólico de uma região necessita de um longo período de coleta para adquirir uma confiabilidade mínima das análises, isso faz com que as pesquisas brasileiras nessa área ainda sejam bastante reduzidas, porém necessárias. 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, realizou pesquisas sobre a disponibilidade do potencial eólico no Rio Grande do Sul, através de estudos para a determinação o comportamento anual e sazonal do regime de ventos da região. Os dados de velocidade e direção dos ventos horizontais são coletados da plataforma de Referência 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 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 2010. Estudos estatísticos sobre a sazonalidade dos ventos, empregando ajustes de parâmetros de distribuições de frequência, dentre as quais as distribuições de Rayleigh e Weibull, vêm sendo desenvolvidos 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 e criado a Rosa dos Ventos, 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 altas frequências na direção sudeste (SE) durante a primavera-verão e na direção nordeste (NE) no período outono-inverno. Os valores de velocidade média ( $U$ ), densidade de potência ( $P$ ) e fator de escala ( $A$ ) da distribuição estatística de Weibull foram maiores durante o inverno e a primavera, e o fator de forma ( $k$ ) foi maior durante a primavera e o verão para as alturas



de 25, enquanto que a 50 metros foi durante o verão e o inverno. Ao analisar as direções predominantes, observou-se alta frequência do vento sudeste (SE) para as quatro estações, porém para as estações outono-inverno há predomínio do vento nordeste (NE). Baseando-se na literatura especializada este estudo sugere que a região central do Rio Grande do Sul é adequada para possível exploração de forma econômica da energia eólica na região. No entanto, uma série maior de dados deve ser analisada visando maior segurança a futuros investimentos no setor energético na região.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>5</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>11</b>
<b>SIGLAS E ABREVIATURAS</b> .....	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>13</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
<b>INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA</b> .....	<b>15</b>
2.1. <i>O Projeto SONDA</i> .....	<b>15</b>
2.1.1. <i>Qualificação dos dados pelo Projeto SONDA</i> .....	<b>16</b>
2.2. <i>Estação de referência SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul</i> .....	<b>19</b>
2.3. <i>Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – LRER/CRS/CCR/INPE - MCT</i> .....	<b>22</b>
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>24</b>
<b>ENERGIA EÓLICA</b> .....	<b>24</b>
3.1. <i>Histórico da Energia Eólica</i> .....	<b>24</b>
3.2. <i>Panorama da Energia Eólica</i> .....	<b>26</b>
3.3. <i>Potencial Eólico Brasileiro</i> .....	<b>28</b>
3.4. <i>Potencial eólico do Rio Grande do Sul</i> .....	<b>28</b>
<b>VENTO</b> .....	<b>30</b>
4.1. <i>O Vento – Características gerais</i> .....	<b>30</b>
4.1.1. <i>Força de Gradiente de Pressão</i> .....	<b>30</b>
4.1.2. <i>Força de Coriolis</i> .....	<b>32</b>
4.1.3. <i>Força de Atrito</i> .....	<b>35</b>
4.2. <i>O Vento Geostrófico</i> .....	<b>35</b>
4.3. <i>Ventos na Camada de Atrito</i> .....	<b>36</b>
4.4. <i>Circulação global idealizada</i> .....	<b>37</b>
4.5. <i>Medição do Vento</i> .....	<b>39</b>
<b>AEROGERADORES</b> .....	<b>42</b>
5.1. <i>Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica</i> .....	<b>42</b>
5.2. <i>Principais Componentes de um Aerogerador</i> .....	<b>45</b>
5.3. <i>Modos de Operação de um Aerogerador</i> .....	<b>47</b>
<b>AVALIAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS DE VENTOS</b> .....	<b>49</b>
6.1. <i>Distribuição de frequências dos dados eólicos</i> .....	<b>49</b>
6.2. <i>Comprimento de Rugosidade</i> .....	<b>53</b>
<b>ATIVIDADES DESENVOLVIDAS</b> .....	<b>56</b>
7.1. <i>Manutenção dos equipamentos da estação de referência SONDA – SMS</i> .....	<b>56</b>
7.2. <i>Coleta, Redução e Análise dos Dados da estação de referência SONDA – SMS</i> .....	<b>57</b>
7.3. <i>Acompanhamento da visita técnica de engenheiros do Projeto SONDA ao Observatório Espacial do Sul</i> .....	<b>58</b>
<b>METODOLOGIA APLICADA AOS DADOS DE VENTO</b> .....	<b>60</b>
8.1. <i>Obtenção dos dados de ventos</i> .....	<b>60</b>
8.2. <i>Estudo do comportamento anual e sazonal do regime de ventos</i> .....	<b>62</b>
8.3. <i>Cálculo do comprimento de rugosidade do local</i> .....	<b>63</b>
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>64</b>
9.1. <i>Comportamento anual e sazonal do regime de ventos</i> .....	<b>64</b>
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>68</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. ....	16
FONTE: (SONDA, 2009) .....	16
FIGURA 2.2. CÓDIGOS DE VALIDAÇÃO DO SONDA PARA TRÊS SITUAÇÕES DIFERENTES. ....	18
FONTE: (SONDA, 2009). ....	18
FIGURA 2.3. GRÁFICOS CONTENDO INFORMAÇÕES SOBRE A QUALIFICAÇÃO DE DADOS DA ESTAÇÃO SONDA – SMS NO MÊS DE FEVEREIRO DE 2009. FONTE: (SONDA, 2009). ....	19
FIGURA 2.4. ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA SONDA – SMS INSTALADA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, EM SÃO MARTINHO DA SERRA, RS. ....	20
FIGURA 2.5. TORRE ANEMOMÉTRICA INSTALADA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE – MCT. EM DESTAQUE O POSICIONAMENTO DOS TRÊS ANEMÔMETROS INSTALADOS A 10, 25 E 50 METROS. ....	20
FIGURA 3.1. MOINHO DE VENTO TÍPICO DA HOLANDA. ....	24
FONTE: ENERGIA EÓLICA: PRINCÍPIOS E TECNOLOGIAS, 2008. ....	24
FIGURA 3.3. PROGNÓSTICO PARA O CRESCIMENTO DAS FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL. FONTE: EREC, 2004. ....	27
FIGURA 3.4. VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO A ALTURA DE 50 METROS NO TERRITÓRIO BRASILEIRO. FONTE: ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO, 2001. ....	28
FIGURA 3.5. VENTO MÉDIO ANUAL A 50 METROS DE ALTURA NO RIO GRANDE DO SUL. FONTE: ATLAS EÓLICO: RIO GRANDE DO SUL, 2002. ....	29
FIGURA 4.1. PRESSÃO HORIZONTAL ATUANDO SOBRE UMA PEQUENA PARCELA DE FLUIDO. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009).....	31
FIGURA 4.2. SISTEMA DE COORDENADAS FIXO À TERRA (SISTEMA NÃO-INERCIAL). FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009).....	32
FIGURA 4.3. COMPONENTES DA FORÇA DE CORIOLIS. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009). 34	
FIGURA 4.4. O EFEITO DE CORIOLIS PARA UM DESLOCAMENTO NORTE-SUL. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009). ....	34
FIGURA 4.5. EVIDÊNCIA DO EFEITO DA FORÇA DE CORIOLIS EM FUNÇÃO DA LATITUDE. FONTE: AMÊNDOLA, 2007.....	35
FIGURA 4.6. O VENTO GEOSTRÓFICO NO HEMISFÉRIO SUL. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009).....	36
FIGURA 4.7. EFEITO DO ATRITO SOBRE O VENTO. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009). 37	
FIGURA 4.8. CIRCULAÇÃO GLOBAL NUMA TERRA SEM ROTAÇÃO (HADLEY). FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009). ....	38
FIGURA 4.9. CIRCULAÇÃO GLOBAL IDEALIZADA NO MODELO DE CIRCULAÇÃO DE TRÊS CÉLULAS. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009). ....	38
FIGURA 4.10. CATA-VENTO TIPO WILD. FONTE: METEOROLOGIA BÁSICA – NOTAS DE AULA (2009). 40	
FIGURA 4.11. ANEMÔMETRO DE CONCHAS. FONTE: RINCONDELVAGO (2009).....	41
FIGURA 4.12. ANEMÔMETRO DE HÉLICE. FONTE: CAMPBELLSCI (2009).....	41
FIGURA 5.1. VARIAÇÃO DA MASSA ATRAVÉS DA ÁREA DE VARREDURA. FONTE: MARQUES (2004). ....	43
FIGURA 5.2. VARIAÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO ATRAVÉS DO ROTOR DA TURBINA. FONTE: MARQUES (2004). ....	44
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). ....	45
FIGURA 5.5. PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM AEROGERADOR. FONTE: AMÊNDOLA ..... 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	

*Relatório Final de Atividades, 2010*

(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 (2009).	57
FIGURA 8.1. ANEMÔMETRO R. M. YOUNG MODELO 05106. FONTE: CAMPBELLSKI (2009).	60
FIGURA 8.2. EQUIPAMENTO DE MEDIDA DE DADOS EÓLICOS DA ESTAÇÃO DE REFERÊNCIA SONDA – SMS, INSTALADA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.	61
FIGURA 8.3. DIAGRAMA DO SENSOR DE MEDIDA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO. FONTE: CAMPBELLSKI (2009).	62
FIGURA 9.1. DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS VENTOS A 25M DE ALTURA MEDIDA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.	64
FIGURA 9.2. DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS VENTOS A 50M DE ALTURA MEDIDA NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.	64



## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1.	SIGNIFICADO DOS CÓDIGOS DE VALIDAÇÃO DOS DADOS SONDA. FONTE: (SONDA, 2009).	17
TABELA 6.1.	CLASSIFICAÇÃO DA RUGOSIDADE DE SUPERFÍCIES TÍPICAS. FONTE: (KROHN, S., 2001).	55
TABELA 9.1.	PARÂMETROS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS VENTOS MEDIDOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE - MCT. ....	65
TABELA 9.2.	PARÂMETROS DA ANÁLISE ESTATÍSTICA SAZONAL DOS VENTOS MEDIDOS NO OBSERVATÓRIO ESPACIAL DO SUL – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.....	65
TABELA 9.3.	ANÁLISE ESTATÍSTICA SAZONAL DOS VENTOS EM SUAS DIREÇÕES PREDOMINANTES A 25 E 50 METROS.	66

## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

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  
CT – Centro de Tecnologia  
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  
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  
SMS - São Martinho da Serra  
SONDA - Sistema de Organização de Dados Ambientais  
TSI - *Total Sky Imager*  
USB – *Universal Serial Bus*  
UFSM - Universidade Federal de Santa Maria  
WMO - *World Meteorological Organization*

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a demanda energética tem aumentado principalmente em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, em função do crescimento das atividades econômicas e da melhoria da qualidade de vida. Além disso, o esgotamento dos recursos hídricos e a queima de combustíveis fósseis têm causado danos irreversíveis ao meio ambiente, comprometendo a qualidade de vida das gerações futuras. Desde o século passado, o petróleo tem sido a fonte de energia mais importante, porém este recurso é não renovável. Dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de formas alternativas de energia.

Entende-se por Energias Renováveis quaisquer formas de energia cuja taxa de utilização seja inferior a sua taxa de renovação, podendo-se citar a energia solar, eólica, biomassa, geotérmica e hidráulica.

No Brasil, a energia hidráulica ou hidroelétrica é a principal fonte de energia para a geração de eletricidade, mas, apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, sua utilização causa graves impactos ambientais, como o alagamento de grandes áreas. A Figura 1.1 apresenta a atual conjuntura energética do Brasil.

Neste contexto, os recursos energéticos solares e eólicos se apresentam como alternativas limpas, não danosas ao meio ambiente e de caráter renovável. 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.

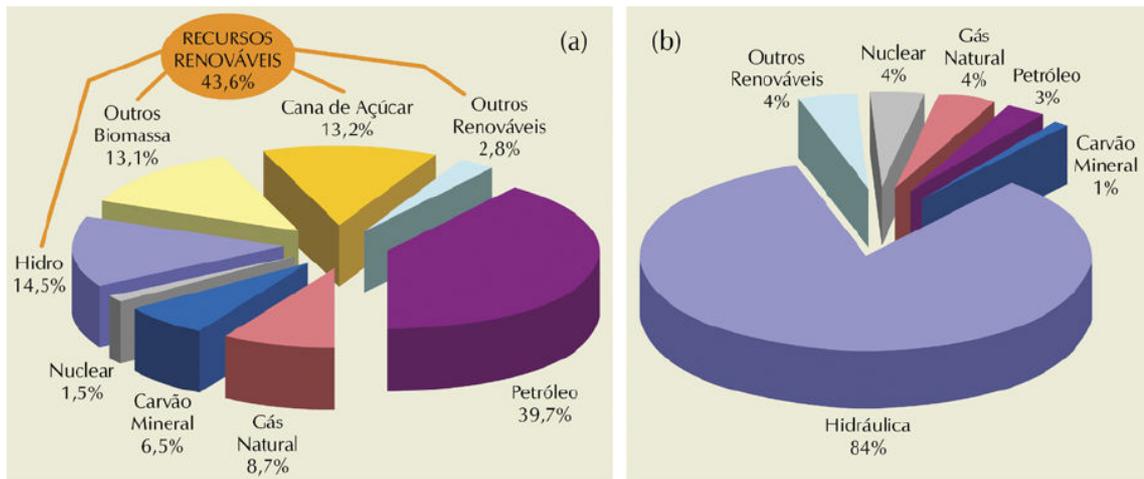


Figura 1.1. (a) Representação da matriz de oferta de energia primária brasileira; (b) Formas de energia utilizadas para a geração de eletricidade no Brasil. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (2006).

A pesquisa científica e o desenvolvimento tecnológico vêm recebendo grandes incentivos em todo o mundo, principalmente após o último 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 para o setor de energia) com o intuito de realizar medidas solarimétricas, eólicas e de outras variáveis meteorológicas necessárias ao estabelecimento do referido banco de dados.

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).

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.

## CAPÍTULO 2

### INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA

#### 2.1. O Projeto SONDA

O Projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) tem como principal objetivo a instalação e a operação de uma rede de estações coletoras de dados solarimétricos, eólicos e meteorológicos em superfície no Território Brasileiro. Os dados levantados são destinados à avaliação e ao refinamento de modelos para estimativa e previsão do potencial energético renovável, principalmente a solar e a eólica, devido à inexistência de informações adequadas e confiáveis sobre a disponibilidade e variabilidade desses recursos no território nacional. Após um processo de qualificação, os dados são disponibilizados ao público a partir da Internet ([www.cptec.inpe.br/sonda](http://www.cptec.inpe.br/sonda)), tais como dados de campo, estatísticas sobre a variabilidade climática e outras informações climáticas destinadas ao setor de planejamento energético público e privado, possibilitando desenvolver e implementar diversos produtos e serviços.

A rede SONDA possui estações de superfície para aquisição de dados em diversos sítios do território brasileiro, conforme apresentado na Figura 2.1, as quais possibilitam ampla cobertura para a determinação das regiões com maior potencial para geração energética. As estações são classificadas em Estações de Referência, Solares Básicas, Solares Avançadas e Eólicas conforme seus equipamentos instalados.

A rede SONDA possui quatro estações de referência, que estão localizadas em Petrolina – PE, Brasília - DF, São Martinho da Serra – RS no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT e Rolim de Moura – RO. Uma quinta estação será implantada em breve em Cachoeira Paulista - SP. A localização destas estações foi estabelecida de modo a representar as principais regiões macroclimáticas do país: a região semiárida do Nordeste, a região amazônica, a região do cerrado no Planalto Central, a região de clima temperado no sul do Brasil e a região Sudeste (Martins et al., 2007). Estas estações são as mais completas do Projeto SONDA, pois possuem sensores solares, meteorológicos e eólicos que realizam as seguintes medidas:

- Medidas Solares – radiação global horizontal, radiação direta normal, radiação

difusa horizontal, radiação de onda longa descendente, radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e iluminância (Lux);

- Medidas Meteorológicas – temperatura, umidade relativa e pressão do ar atmosférico à superfície e precipitação de chuva;
- Medidas Eólicas – velocidade e direção do vento nas alturas de 10, 25 e 50 metros a partir da superfície e temperatura nas alturas de 25 e 50 metros.

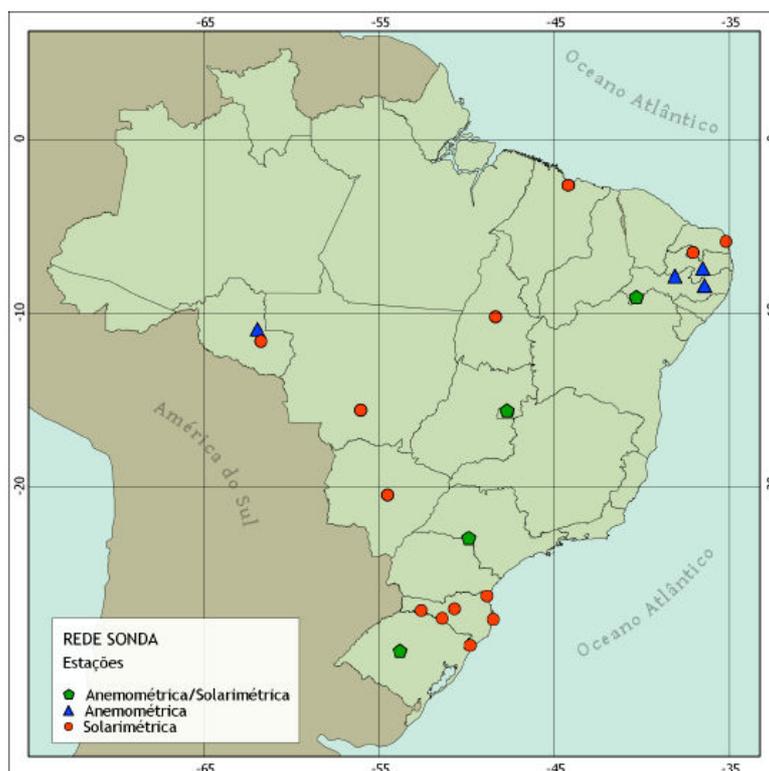


Figura 2.1. Mapa com as localizações das estações SONDA no Território Brasileiro.

Fonte: (SONDA, 2009)

### 2.1.1. Qualificação dos dados pelo Projeto SONDA

Antes de serem disponibilizados ao público em geral, os dados obtidos pelas estações SONDA passam por um processo de qualificação. Esse processo objetiva identificar, através de algoritmos, os dados suspeitos. Os critérios de qualidade adotados seguem o padrão da BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*), para os dados solares, e pela Webmet.com, para os dados meteorológicos e eólicos. A qualificação apenas sinaliza os dados suspeitos de estarem incorretos, no entanto não os modifica ou exclui, ficando a critério do usuário sua

utilização. A sinalização é feita através de códigos numéricos com quatro dígitos armazenados em arquivos próprios. Mensalmente é disponibilizado, através no site, um arquivo com os dados e um com a qualificação correspondente.

O processo de controle de qualidade é composto por 4 etapas sequenciais iniciadas com filtros mais grosseiros e finalizadas com filtros mais refinados.

Os algoritmos executados em cada uma das etapas adotam os seguintes critérios estabelecidos de acordo com padrões internacionais adotados em redes internacionais como a BSRN e WEBnet. 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.

Alguns procedimentos são aplicados apenas para os dados coletados por sensores radiométricos, enquanto outros são aplicados para as variáveis meteorológicas básicas como a temperatura, pressão, velocidade do vento, etc. O resultado de cada uma das etapas aplicadas ao controle de qualidade é dado na forma de um código numérico, lidos da direita para a esquerda, que classificam o valor medido dentro dos parâmetros apresentados na Tabela 2.1. Um detalhamento maior do procedimento de qualificação pode ser obtido em [www.sonda.cptec.inpe.br/](http://www.sonda.cptec.inpe.br/).

Tabela 2.1. Significado dos códigos de validação dos dados SONDA. Fonte: (SONDA, 2009).

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 “passou” 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.

Objetivando 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 e meteorológicos da estação SONDA-SMS para o mês de fevereiro de 2009 é apresentado como exemplo na Figura 2.3.

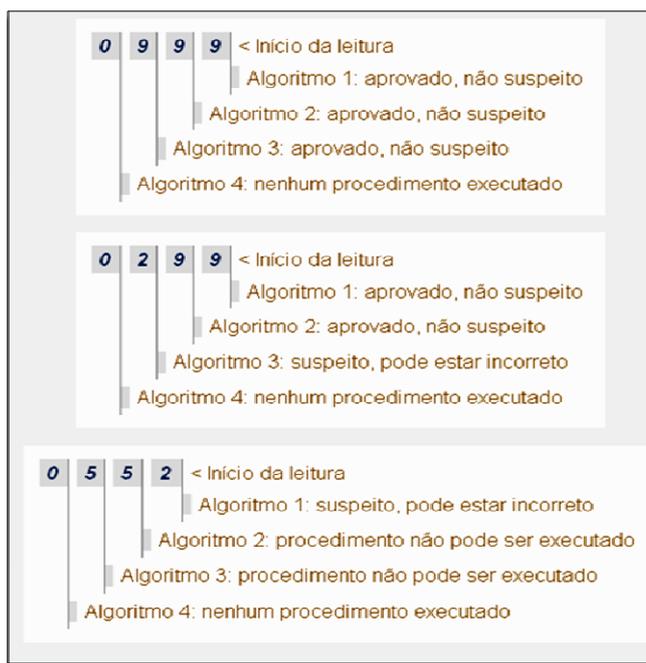


Figura 2.2. Códigos de validação do SONDA para três situações diferentes.

Fonte: (SONDA, 2009).

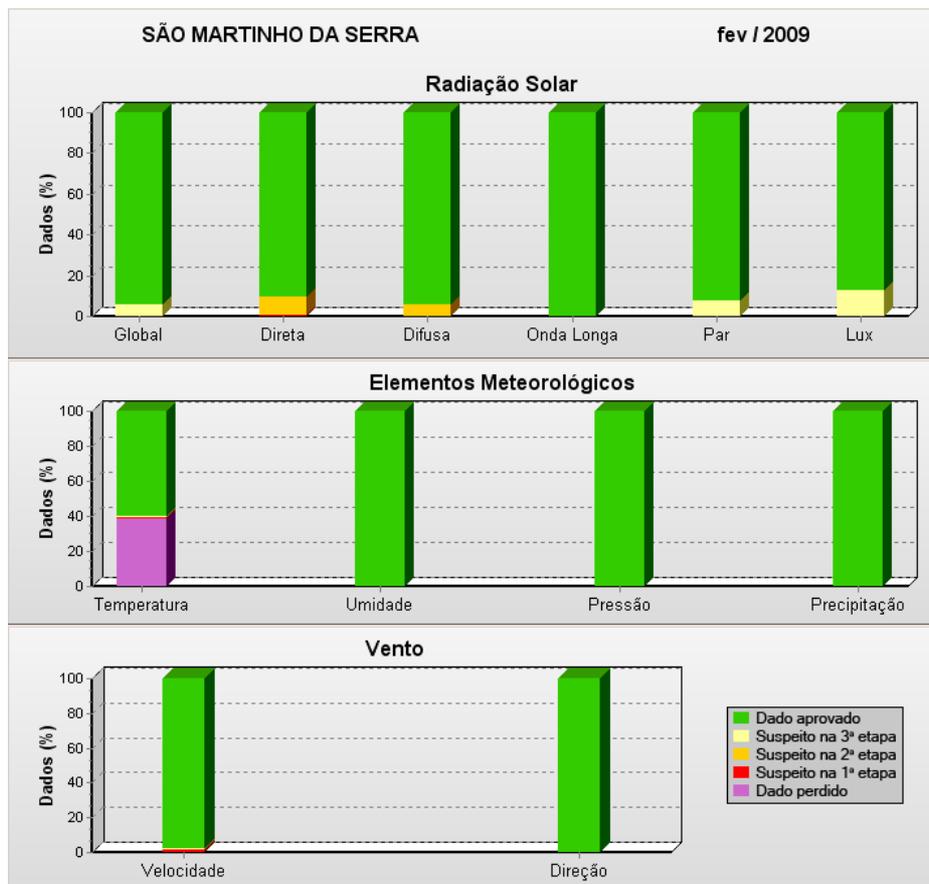


Figura 2.3. Gráficos contendo informações sobre a qualificação de dados da estação SONDA – SMS no mês de fevereiro de 2009. Fonte: (SONDA, 2009).

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

A estação de referência SONDA – SMS ( $29^{\circ} 26' 34''$  S,  $53^{\circ} 49' 23''$  O) está instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, 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 de referência 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 de referência 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 em alturas padrões de 10, 25 e 50 metros.

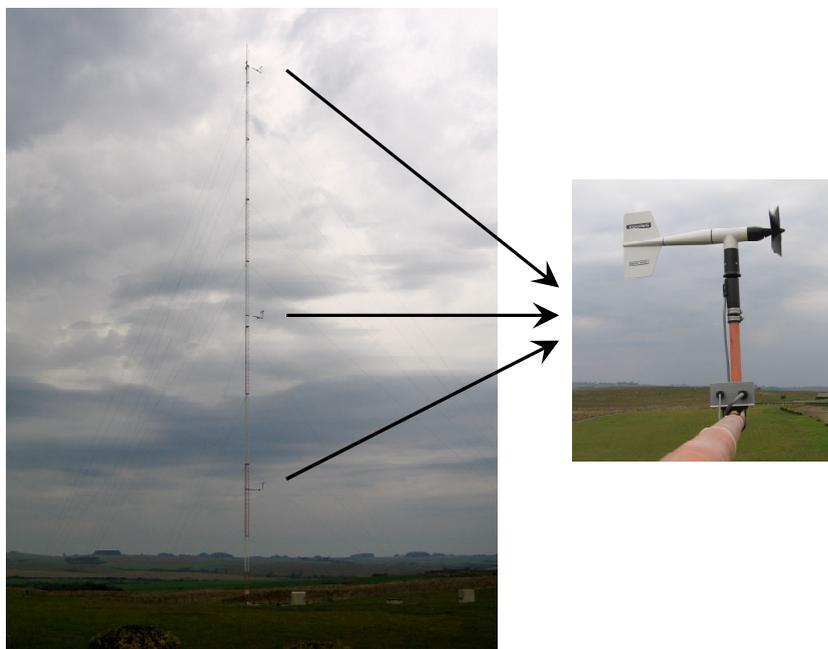


Figura 2.5. Torre Anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT. Em destaque o posicionamento dos três anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros.

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 de referência 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)* – o “*Tracker*” ou posicionador de dois eixos rastreia o caminho solar permitindo a realização das medidas de radiação solar difusa e direta por equipamentos acoplados a ele;
- Pireliômetro NIP (*Eppley Laboratory, Inc*) – trata-se de um Pireliômetro 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 “*Tracker 2AP*”;
- Pirgeômetro PIR (*Eppley Laboratory, Inc*) – é um Radiômetro de Infravermelho de Precisão que efetua medidas de radiação de onda longa ou radiação terrestre na faixa de 3500 a 5000 nm. Este sensor possui um domo de silicone para separação da radiação de onda longa e radiação de onda curta durante o dia;
- LUX Lite (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de luz visível, expressa em unidades de iluminância, através da simulação da resposta espectral do olho humano à radiação visível incidente;
- PAR Lite (*Kipp & Zonen*) – efetua medidas de radiação PAR – Radiação Fotossinteticamente Ativa durante o dia no intervalo de radiação solar visível de 400 a 700 nm;
- Fotômetro Cimel CE (*Cimel Electronique*) – Sua principal aplicação é a medida da radiação oriunda do Sol ou do céu, determinando a coluna total de vapor d’água, ozônio

- e aerossóis, utilizando uma combinação de filtros espectrais e um sistema de apontamento com movimento azimutal e zenital.
- *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. Imagens do céu são coletadas a cada 15 minutos durante o dia. As imagens são processadas pelo programa *TSI Manager Software*, que avalia 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. Esta parceria propicia a formação de recursos humanos e o desenvolvimento de pesquisas cujos resultados vêm sendo apresentados tanto em eventos



científicos nacionais como internacionais. Os dados coletados permitiram a obtenção do perfil preliminar dos potenciais eólico e solar da região central do Rio Grande do Sul.

## 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: Energia Eólica: Princípios e Tecnologias, 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 cata-ventos 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 dos preços do petróleo, diversos países, inclusive o Brasil, dispenderam 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 ao sistema elétrico, 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 3.2a-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 208 MW ao longo de 2006, finalizando o ano com 237 MW de capacidade instalada (GWEC, 2006). Esse acréscimo deve-se em grande parte à instalação dos parques eólicos de Osório (RS) que totalizam 150 MW. O complexo eólico 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).

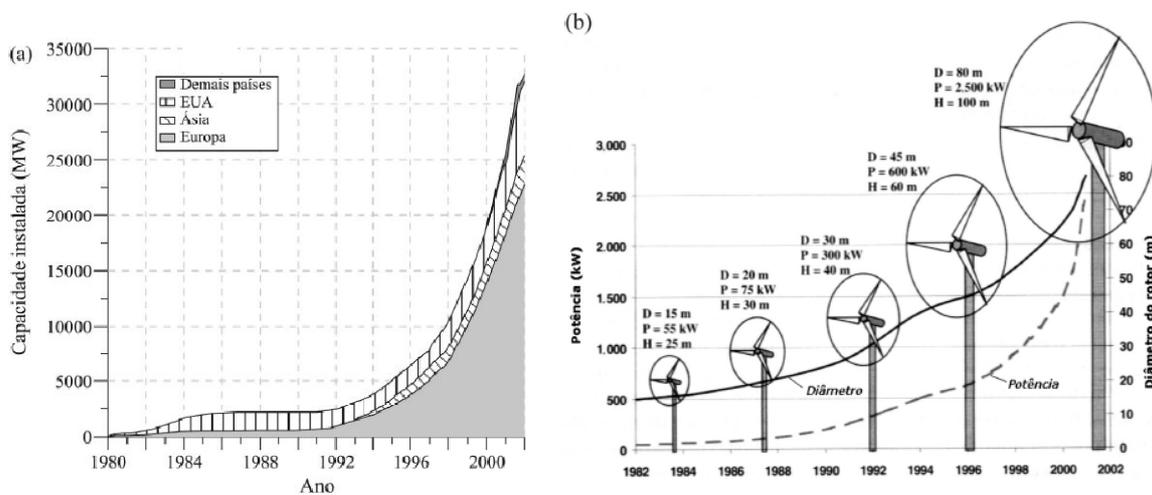


Figura 3.2. (a) Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo. (b) Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1980 e 2002. Fonte: R. Gasch and J. Twele, 2002.

### 3.2. Panorama da Energia Eólica

Os ventos se caracterizam por serem uma fonte de energia limpa, renovável e disponível em todos os lugares. Esta 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 50m. 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).

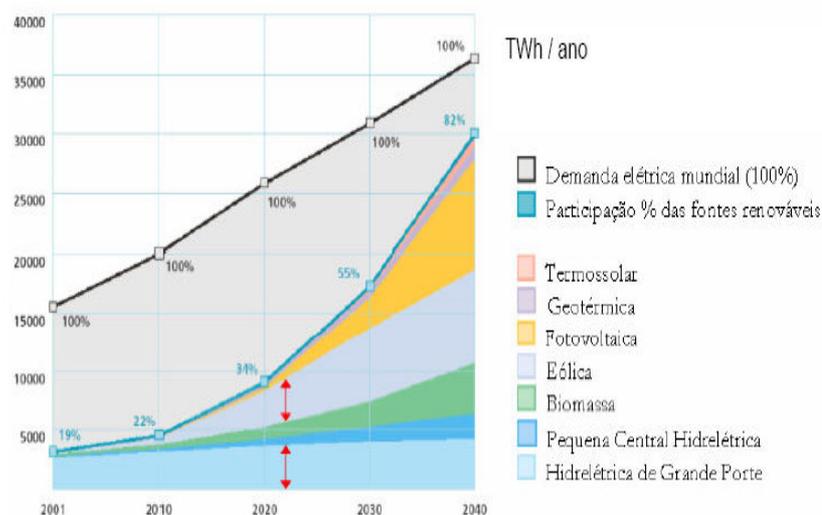


Figura 3.3. Prognóstico para o crescimento das fontes renováveis na matriz elétrica mundial. Fonte: EREC, 2004.

### 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.

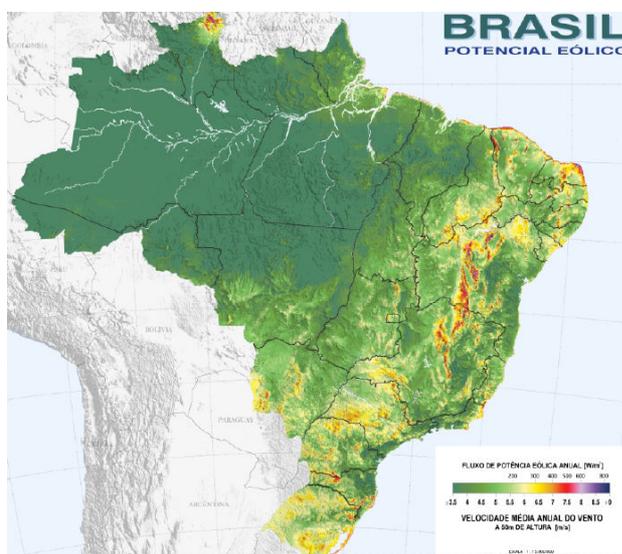


Figura 3.4. Velocidade média do vento a altura de 50 metros no Território Brasileiro.

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. Esta 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.

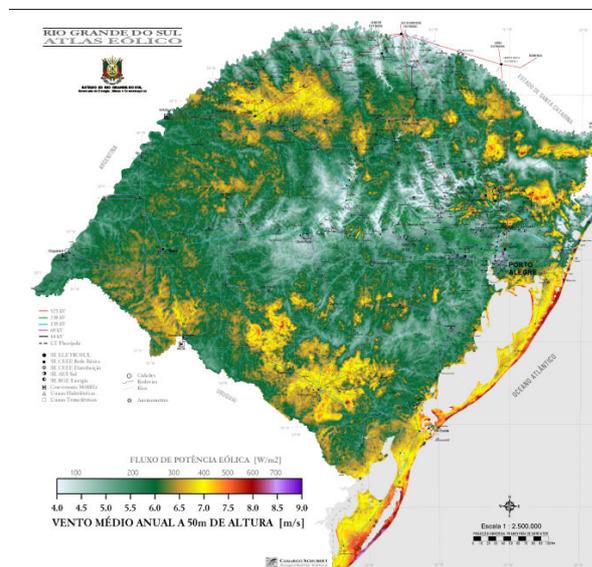


Figura 3.5. Vento médio anual a 50 metros de altura no Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Eólico: Rio Grande do Sul, 2002.

## 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  $n$ , é a derivada parcial de  $p$  em relação a  $n$ , considerando  $s$  e  $z$  como constantes.

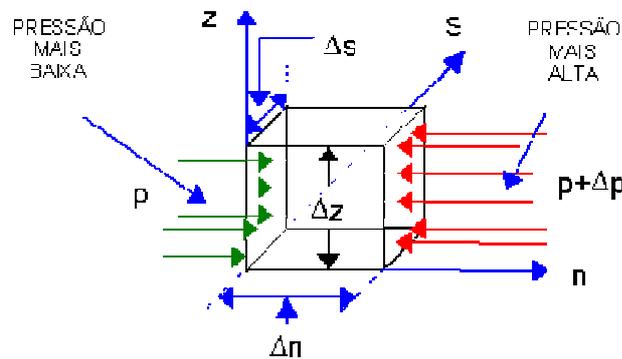


Figura 4.1. Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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

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

O sinal negativo indica que a força resultante aponta no sentido negativo do eixo  $n$ , ou seja, da pressão mais alta para a pressão mais baixa. Dividindo-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.

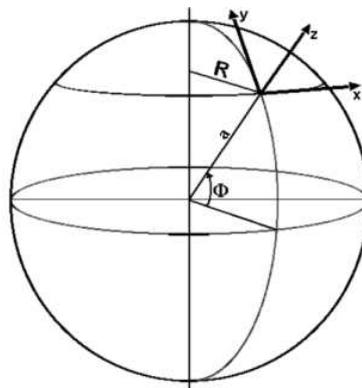


Figura 4.2. Sistema de coordenadas fixo à Terra (Sistema não-inercial). Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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:

$$\Sigma \vec{f} = -\frac{(\Omega R + u)^2}{R} \hat{R} = -\left( \Omega^2 R \hat{R} + 2\Omega u \hat{R} + \frac{u^2}{R} \hat{R} \right) \quad (4.5)$$

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:

$$\text{na direção horizontal} \quad -2\Omega u \sin \phi \quad (4.6)$$

$$\text{e na direção vertical} \quad 2\Omega u \cos \phi \quad (4.7)$$

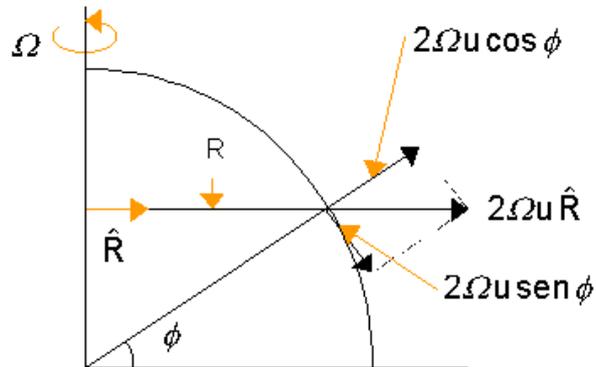


Figura 4.3. Componentes da Força de Coriolis. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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 Pólo Norte - equador, observa-se que ocorre um desvio para a direita do percurso, devido à rotação anti-horária do Hemisfério Norte, visto do espaço conforme ilustra a Figura 4.4.

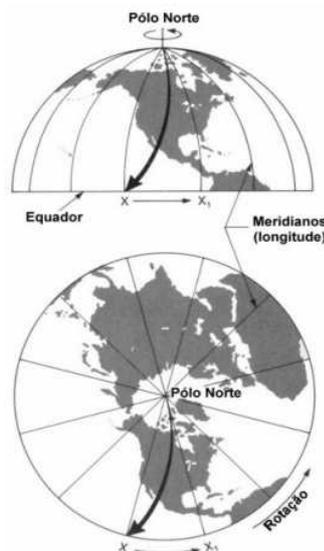


Figura 4.4. O Efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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 pólos, conforme pode-se visualizar na Figura 4.5.

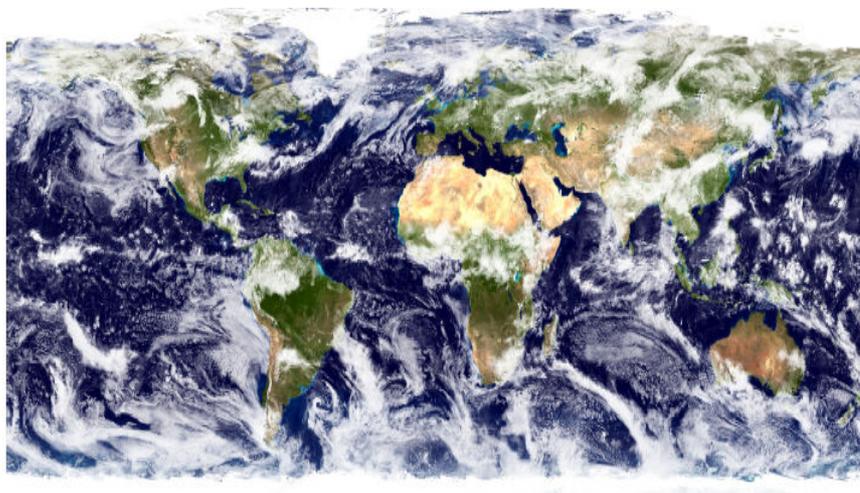


Figura 4.5. Evidência do efeito da força de Coriolis em função da latitude. Fonte: Amêndola, 2007.

#### 4.1.3. Força de Atrito

A terceira força que atua sobre os ventos tem o efeito de reduzir, frear 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.

A Figura 4.6 mostra como o equilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis é atingido. Sob a ação da força do gradiente de pressão, perpendicular às isóbaras, as parcelas de ar começam a ser aceleradas da área de maior pressão para a área de menor pressão. Logo que o movimento se inicia, a força de Coriolis causa um desvio para a esquerda no Hemisfério Sul (e para a direita no Hemisfério Norte). A parcela continua a se acelerar, a

velocidade aumenta e a força de Coriolis também, aumentando o desvio para a esquerda. Eventualmente, as duas forças chegam ao equilíbrio, de modo que o vento passará a possuir uma velocidade constante, paralela às isóbaras. Diz-se então que foi atingido o balanço geostrófico.



Figura 4.6. O vento geostrófico no Hemisfério Sul. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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.

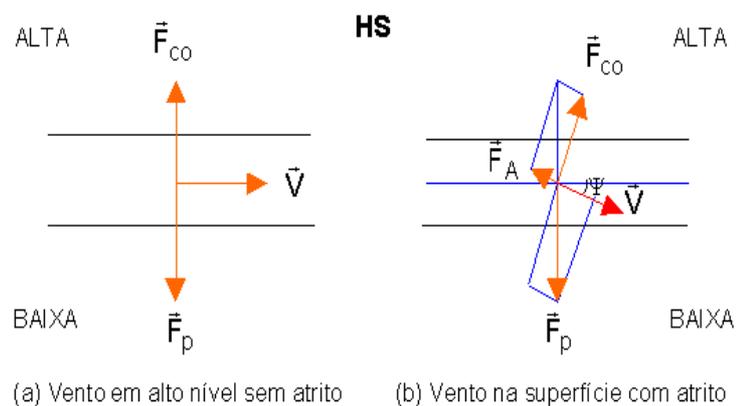


Figura 4.7. Efeito do atrito sobre o vento. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

#### 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.

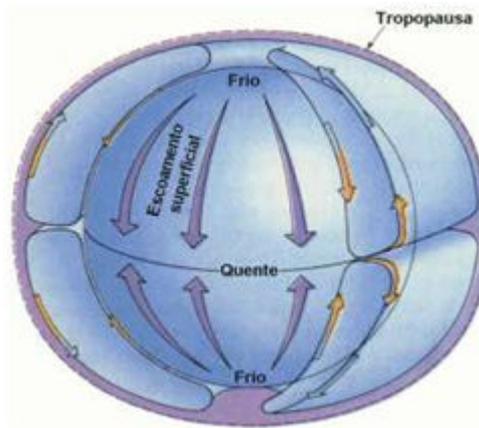


Figura 4.8. Circulação global numa Terra sem rotação (Hadley). Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

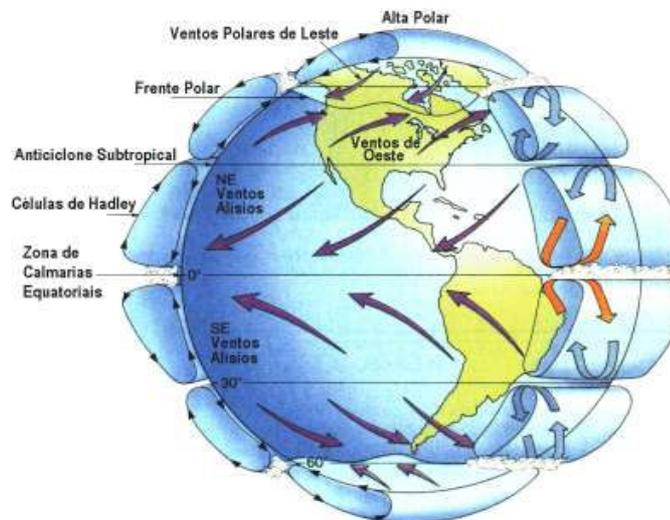


Figura 4.9. Circulação global idealizada no modelo de circulação de três células. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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  $20^\circ$  e  $35^\circ$  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.

Neste modelo, a circulação entre  $30^\circ$  e  $60^\circ$  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 cata-vento 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.

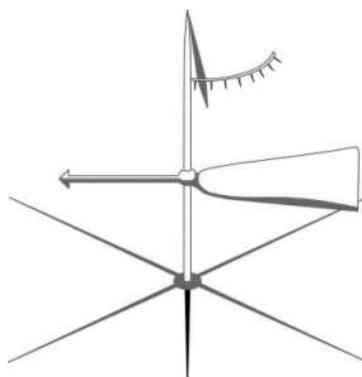


Figura 4.10. Cata-vento tipo Wild. Fonte: Meteorologia Básica – Notas de Aula (2009).

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.

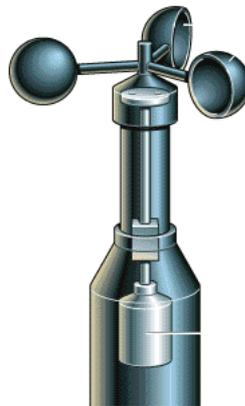


Figura 4.11. Anemômetro de conchas. Fonte: Rincondelvago (2009).

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:

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

E: energia cinética (joules);

m: massa do ar (Kg);

v: velocidade do vento (m/s).

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

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

P: potência disponível no vento (W);

t: tempo (s);

$\dot{m}$  : 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:

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

$\rho$  : densidade do ar (Kg/m<sup>3</sup>);

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):

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

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

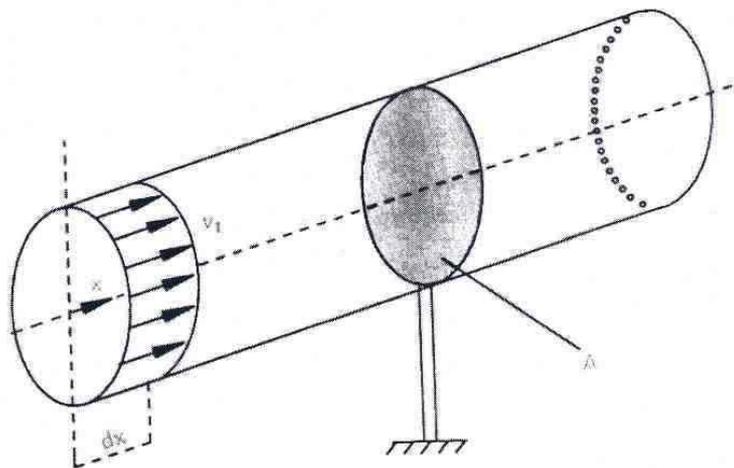


Figura 5.1. Variação da massa através da área de varredura. Fonte: Marques (2004).

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).

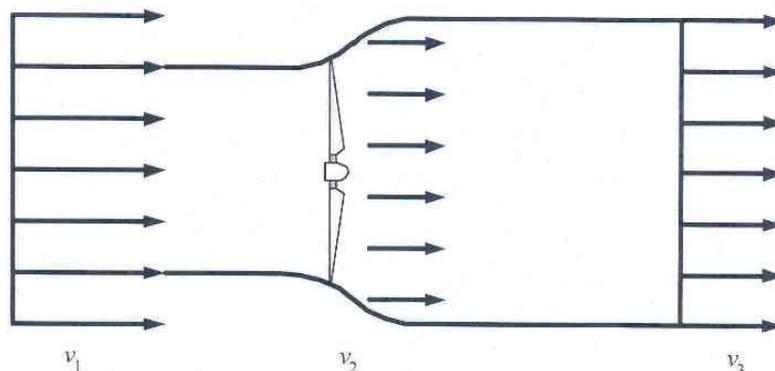


Figura 5.2. Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina. Fonte: Marques (2004).

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 mostra a Figura 5.3 (Carvalho, P., 2003).

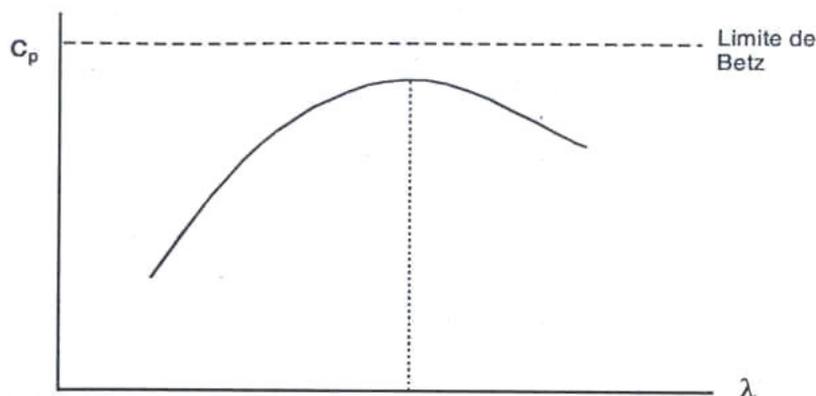


Figura 5.3. Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica. Fonte: Carvalho (2003).

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.

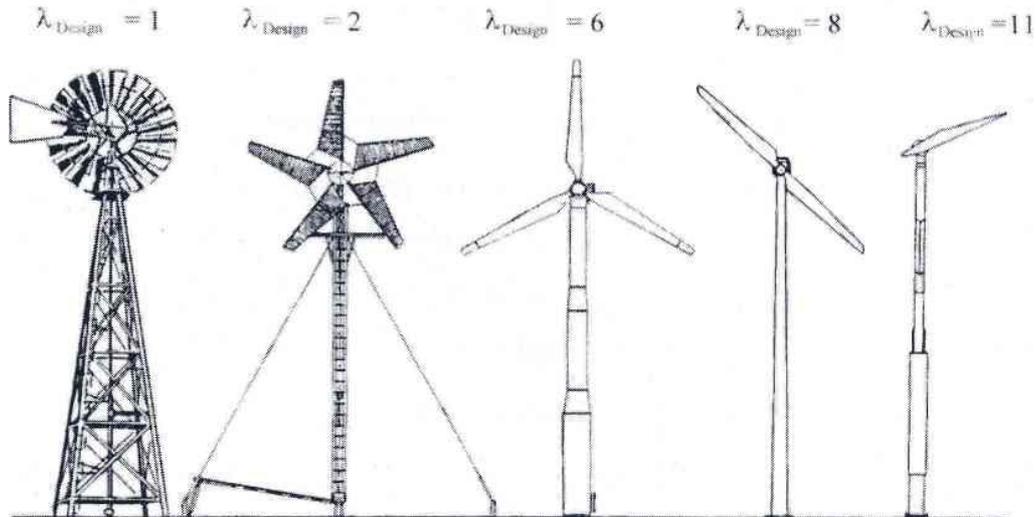


Figura 5.4. Velocidade Específica para diferentes tipos de turbinas eólicas. Fonte: Marques (2004).

## 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:

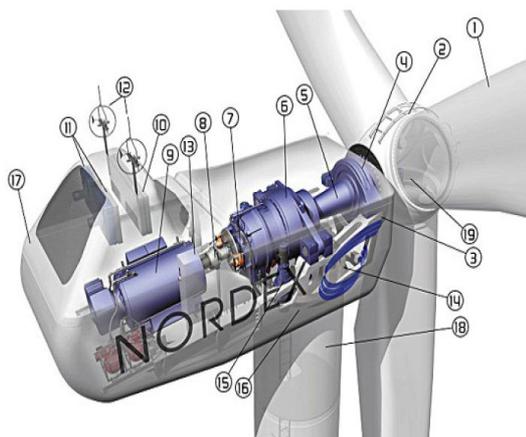


Figura 5.5. Principais componentes de um Aerogerador. Fonte: Amêndola (2007).

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 nacele 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 nacele.

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, extraíndo do escoamento quantidades particulares de potência para cada velocidade, de acordo com a curva apresentada na Figura 5.6. Nesta Figura, pode-se verificar que existem diferentes comportamentos na potência gerada para diferentes intervalos de velocidades do vento, definindo diferentes modos ou regiões de operação.

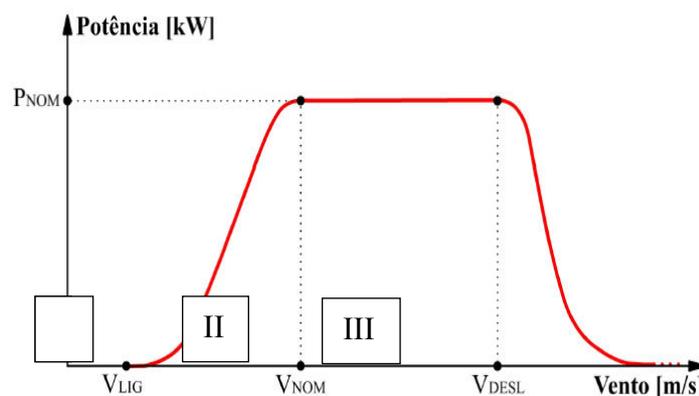


Figura 5.6. Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador. Fonte: Amêndola (2007).

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.

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):

$$E_{\text{Total}} = \sum f_i P_i T \quad (6.1)$$

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. Desta forma, através de longas séries de medições de alta qualidade, podem ser verificados importantes aspectos, como a variação sazonal e variação anual 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.

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

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

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

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

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

Uma das vantagens desta distribuição é a necessidade de apenas um parâmetro para a definição da distribuição, possibilitando o uso em locais que tenham disponíveis apenas valores médios de velocidade do vento, 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.

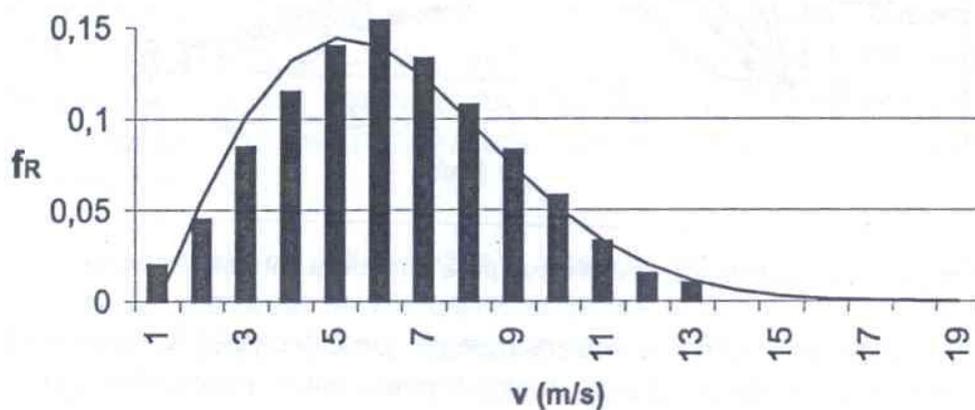


Figura 6.2. Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh. Fonte: Carvalho (2003).

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:

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

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.

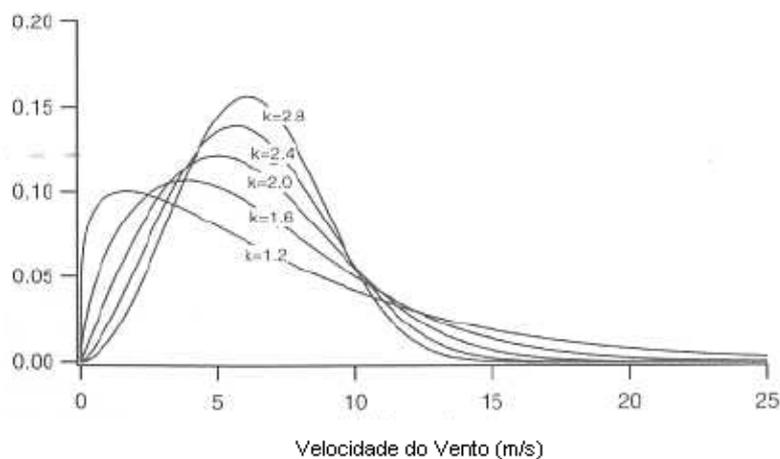


Figura 6.3. Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Manwell, et al., 2002.

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

$$S = \frac{\sigma}{\bar{v}} \quad (6.6)$$

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

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

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

## 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).

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

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

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

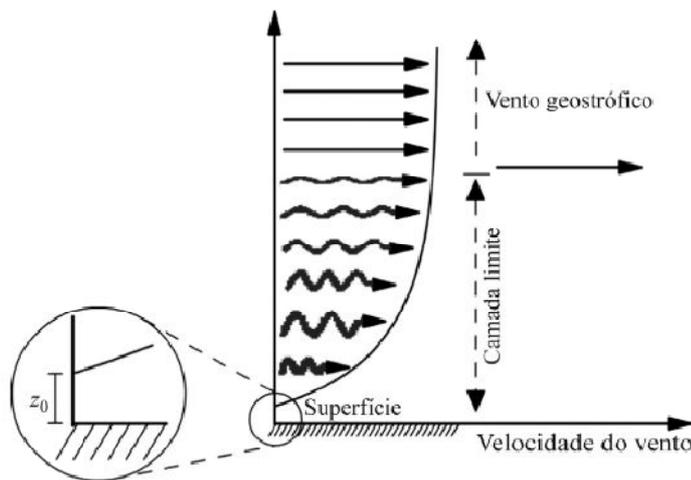


Figura 6.4. Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) é a altura na qual a velocidade é nula.

Fonte: (Martins, F.R. et al., 2007).

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.

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

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

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 (Manwell et al., 2002):

$$\alpha = 0,096 \cdot \log z_0 + 0,016 \cdot (\log z_0)^2 + 0,24 \quad (6.11)$$

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 lisa, 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 de referência SONDA – SMS**

Através de uma rotina de manutenção há a intenção de reduzir ou evitar a perda de dados e do desempenho dos equipamentos, pois é de extrema importância a obtenção de dados confiáveis. A partir de visitas periódicas, realizadas pelos alunos do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis, visa-se a conservação física dos sensores resultando numa probabilidade baixa 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.

Sílica gel é usada para 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. Além disso, 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 este motivo, os equipamentos admitem a introdução no seu interior de pequenos pacotes contendo sílica gel, os quais são trocados periodicamente evitando que sua coloração mude. 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 contendo álcool isopropílico (o álcool isopropílico é indicado para a limpeza de componentes eletrônicos, pois a porcentagem de água é menor do que 1%, e por isso a hipótese de oxidação das peças é quase nula), este procedimento visa à eliminação de sujeiras presente nos domos, uma vez que a presença de sujeira ocasiona absorção de radiação e, portanto valores de radiação 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 de referência 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.

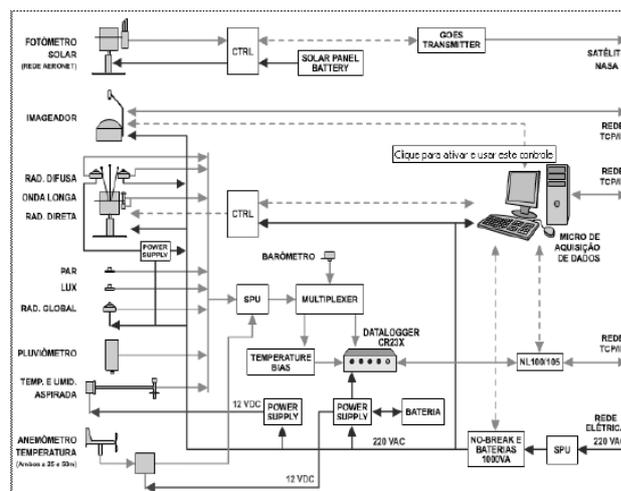


Figura 7.2. Diagrama da configuração local dos equipamentos instalados na estação SONDA – SMS. Fonte: SONDA (2009).

Os sensores solarimétricos da estação SONDA - SMS realizam uma medida a cada

segundo. Estes dados são armazenados pelo Datalogger, que fornece, como dados de saída, os valores médios, máximos, mínimos e o desvio padrão das medidas em cada minuto (1440 medidas diárias) ou a cada 10 minutos no caso das medidas de velocidade e direção do vento nas alturas de 25 e 50 metros.

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. Acompanhamento da visita técnica de engenheiros do Projeto SONDA ao Observatório Espacial do Sul**

O bolsista, juntamente com os estudantes Márcio Ceconi e Eduardo Weide Luiz do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis, acompanhou, durante o período de 14 a 19 de Junho de 2010, a visita técnica dos engenheiros Jorge Luiz Martins Nogueira e José Celso Thomaz Júnior (LIM/CPTEC/INPE – MCT) ao Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT a fim de realizarem substituições e instalações de equipamentos na estação SONDA – SMS.

Os três estudantes receberam um treinamento a respeito de detalhes sobre a instalação



e as formas de medição dos sensores, tópicos de radiação solar e ventos, condições para operação das estações SONDA, rotina de operação e manutenção da estação SONDA – SMS. Os engenheiros instruíram os alunos quanto ao desligamento dos sensores, tornando possível efetuar a sua limpeza interna e externa utilizando pincel, flâmula e água.

## 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, registram os dados de velocidade e direção horizontais dos ventos, no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS. 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. Este 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 de referência SONDA – SMS, instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.

Os diferentes elementos que compõem o anemômetro, incluindo o potenciômetro, que gera os dados de direção dos ventos são apresentados na Figura 8.3.

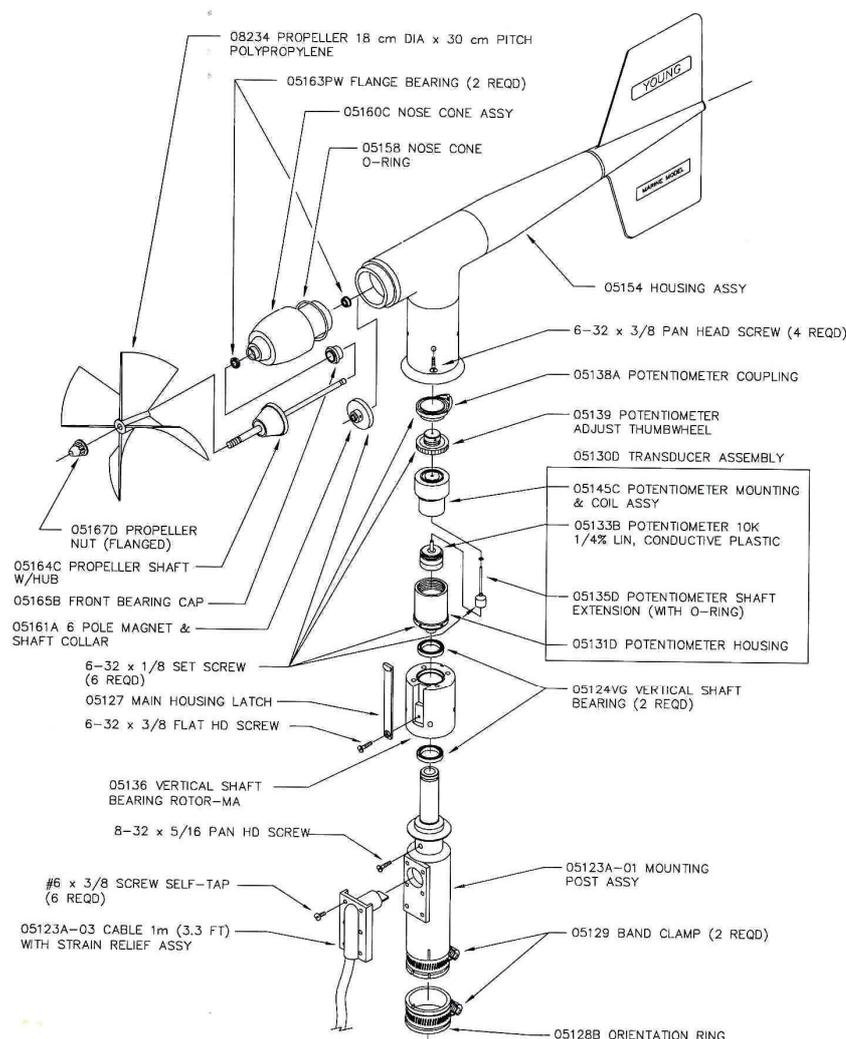
MODEL\_05106\_WIND\_MONITOR-MA  
MARINE MODEL

Figura 8.3. Diagrama do sensor de medida de velocidade e direção de vento. Fonte: Campbellsci (2009).

## 8.2. 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 Março de 2010, conforme coletados pelos anemômetros instalados nas alturas de 25 e 50 metros na estação de referência SONDA - SMS.

Posteriormente, agrupou-se as medidas de cada anemômetro de modo trimestral, de acordo com as estações do ano, obtendo a análise sazonal dos ventos e observando o seu comportamento exclusivamente nas direções predominantes.

Através do aplicativo computacional WASP® (*Wind Atlas Analysis and Application Program*), foram obtidas as funções de distribuição de frequências de Weibull e a rosa dos ventos para todos os dados.

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.

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

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

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

Obtém-se a Equação 8.1:

$$Z_0 = e^{\frac{v(h) \cdot \ln h_{ref} - v_{ref} \cdot \ln h}{v(h) - v_{ref}}} \quad (8.1)$$

Essa Equação pode então ser empregada para calcular diretamente o valor do comprimento de rugosidade do local.

O valor de  $\alpha$  (expoente de camada limite) pode ser calculado através da correlação com o comprimento de rugosidade, através da Equação 6.11

$$\alpha = 0,096 \cdot \log z_0 + 0,016 \cdot (\log z_0)^2 + 0,24 \quad (6.11)$$

## CAPÍTULO 9

### RESULTADOS

#### 9.1. 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 as alturas de 25 e 50 m são representadas nas Figura 9.1 a 9.2.



Figura 9.1. Distribuição estatística dos ventos a 25m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.



Figura 9.2. Distribuição estatística 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 9.1 juntamente com os valores do fator de forma k e o fator de escala A calculados pela função de Weibull.

Tabela 9.1. 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	5,61	234,00	1,78	6,30
50 m	5,88	203,00	2,40	6,60

A análise estatística sazonal dos ventos em todas as alturas tem os seus principais resultados apresentados na Tabela 9.2. De modo geral, observa-se a ocorrência de maiores fatores de escala, densidade de potência e velocidades médias do vento durante o inverno e a primavera.

Os ventos foram predominantes na direção sudeste (SE) durante a primavera-verão-inverno e na direção nordeste (NE) no outono para 25 metros. Para a altura de 50 metros observou-se predominância da direção SE para primavera-verão e NE para outono-inverno. O perfil sazonal dos ventos nas suas direções predominantes é apresentado na Tabela 9.3. Desta forma, tem-se maiores informações a respeito dos padrões de vento predominantes na região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

Tabela 9.2. 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	5,64	182,00	2,35	6,40
	Verão	4,97	133,00	2,16	5,60
	Outono	5,32	197,00	1,80	6,00
	Inverno	6,22	349,00	1,65	7,00
50 m	Primavera	6,28	272,00	2,14	7,10
	Verão	5,28	151,00	2,31	6,00
	Outono	5,40	169,01	2,19	6,10
	Inverno	6,93	297,00	2,81	7,80

Tabela 9.3. Análise estatística sazonal dos ventos em suas direções predominantes a 25 e 50 metros.

Altura	Estação	Direção	Frequência (%)	U (m/s)	P (W/m <sup>2</sup> )	k	A (m/s)
25 m	Primavera	SE	34,50	5,95	206	2,46	6,70
	Verão	SE	29,70	5,24	137	2,54	5,90
	Outono	NE	20,40	6,05	237	2,20	6,80
	Inverno	SE	22,50	6,16	354	1,60	6,90
50 m	Primavera	SE	33,40	6,65	232	3,57	7,40
	Verão	SE	28,20	5,78	166	3,00	6,50
	Outono	NE	20,00	6,75	265	2,99	7,60
	Inverno	NE	22,50	6,93	297	2,81	7,80

## 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.

A partir do banco de dados de velocidade e direção dos ventos coletados pelos anemômetros instalados na estação de referência 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.

Os valores de velocidade média (U), densidade de potência (P) e fator de escala (A) da distribuição estatística de Weibull foram maiores durante o inverno e a primavera, e o fator de forma (k) foi maior durante a primavera e o verão para as alturas de 25, enquanto que a 50 metros foi durante o verão e o inverno. Ao analisar as direções predominantes, observou-se alta frequência do vento sudeste (SE) para as quatro estações, porém para as estações outono-inverno há predomínio do vento nordeste (NE).

Ao comparar os fatores de escala (A) superiores a 6 aliados a um fator de forma (k) da ordem de 2 observados neste estudo com literaturas especializadas, observou-se que a região central do Rio Grande do Sul é adequada para possível exploração econômica da energia eólica. No entanto, uma série maior de dados deve ser analisada visando maior segurança a futuros investimentos no setor energético nesta 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

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 <http://sonda.cptec.inpe.br>).

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/WG1/SPM/17Apr07.pdf>.

Global Wind Energy Council, *Global Wind Energy Outlook 2006*. Disponível em <http://www.gwec.net/index.php?id=65>.

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.

SONDA, Sistema Nacional de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estações do Projeto SONDA. Disponível em <http://sonda.cptec.inpe.br>.

Amarante, O.C., Brower, M., Zack, J., Sá, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001.

Eldridge, F.R. *Wind machines*. Van Nostrand, 1980.

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).

AWEA – American Wind Energy Association. **The Wind Energy Applications Guide**. Washington, 2001. Disponível em: <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>.

G.M. Joselin Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan and S. Rajapadian, *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 11, 1117 (2007).

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).

R. Gasch and J. Twele (eds), *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation* (Solarpraxis AG, Alemanha, 2002).

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.

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).

European Renewable Energy Council, 2004. Renewable Energy Scenario to 2040, pág.11.

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.

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.

Lutgens, Frederick K., Tarbuck, Edward J. **The Atmosphere: an introduction to Meteorology.** Sixth Edition. New Jersey, Prentice Hall, Inc., 462p. 1995.

Grimm, A. M. Meteorologia Básica – Notas de Aula. Disponível em: <http://fisica.ufpr.br/drimm/aposmeteo/>. Acessado em 15 de janeiro de 2009.

[http://www.paulotempo.blogspot.com/2008/05/postagem-especial-sc-um-estado com.html](http://www.paulotempo.blogspot.com/2008/05/postagem-especial-sc-um-estado-com.html)

Rincondelvago. Disponível em: <http://html.rincondelvago.com/pitot.html>. Acesso em 20 de fevereiro de 2009.

Campbellsci. Disponível em: <http://www.campbellsci.com>. Acesso em 20 de fevereiro de 2009.

Carvalho, P. **Geração Eólica.** Fortaleza, Imprensa Universitária, 146p. 2003.

Hansen, M.O.L **Basic Rotor Aerodynamics applied to Wind Turbines.** Dept. of Energy Engineering Fluid Mechanics, Technical University of Denmark, 1998.

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.

Gasch, R. **Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf.** B. G. Teubner, 1996.

Stevenson, W. J. **Estatística Aplicada à administração.** Harper & Row do Brasil, 1981.

R.B. Stull, *An introduction to Boundary Layer Meteorology* (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988).

Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, A. L. Wind energy explained. New York : Wiley,



2002. 569 p.

Krohn, S. **Danish Wind Turbine Manufactures Association – Guided Tour on Wind Energy**. Copenhagen, 2001. Disponível em: <http://www.windpower.org>.