

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

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

**PROCESSO N° 160567/2011-4**

**Marco Aurélio Wobeto Meller – Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCTI**  
**Laboratório de Recursos de Energia Renováveis**  
**LRER/CRS/CCR/INPE – MCTI**  
**Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais**  
**CRS/CCR/INPE - MCTI**  
**E-mail: marcowobeto@yahoo.com.br**

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

**Santa Maria, Julho de 2012**



## **DADOS DE IDENTIFICAÇÃO**

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

Processo CNPq N°: 160567/2011-4

### **Bolsista no período de Novembro/11 a Julho/12:**

**Marco Aurélio Wobeto Meller**

Curso de Engenharia Mecânica

Centro de Tecnologia – CT/UFSM

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

### **Orientadores:**

**Dr. Fernando Ramos Martins**

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

**Dr. Nelson Jorge Schuch**, Co-orientador

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais

E-mail: njschuch@gmail.com

### **Colaboradores:**

**Luiz Felipe Kremer** – Bolsista I.C. do LRER/CRS/CCR/INPE - MCTI e

Graduando do curso de Física – Bacharel da UFSM.

**Paulo Ernesto Marchezi** – Bolsista I.C. do LRER/CRS/CCR/INPE - MCTI e

Graduando do curso de Química – Licenciatura da UFSM.

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

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

Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCTI.

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



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus amigos e à minha família, principalmente à minha Mãe **Mara Lucia Wobeto** e ao meu Pai **Nelson Maica Meller Junior**, que apesar de toda a distancia física, sempre se fizeram presentes e sempre acreditaram em mim, me incentivando e me ajudando a vencer todos os obstáculos e a seguir em frente.

Um obrigado especial ao meu orientador, Dr. Fernando Ramos Martins, Pesquisador do Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/INPE – MCTI, 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-MCTI 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.

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

Agradeço aos colegas do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais por toda a atenção, companheirismo e paciência prestados ao acadêmico.



## RESUMO

A energia proveniente da fonte eólica, ventos, é uma alternativa viável e sustentável para a complementação da matriz energética brasileira. Para viabilizar sua implantação é necessário determinar o potencial eólico para cada região, a partir da análise estatística dos ventos. O Projeto de Pesquisa desenvolvido no Laboratório de Recursos de Energia Renováveis do Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – LRER/CRS/CCR/INPE – MCTI, tem por objetivo avaliar o potencial eólico da Região Central do Rio Grande do Sul, estudar a predominância da direção e a velocidade média dos ventos horizontais, em períodos sazonais e anuais, assim como calcular o comprimento de rugosidade do terreno. Os dados eólicos utilizados nas análises são coletados a partir da estação de referência do projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais) localizada no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS. Os dados são coletados por três anemômetros instalados nas alturas de 10, 25 e 50 metros acima do solo acoplados na torre anemométrica da estação. A série de dados utilizada no estudo compreende o período de Janeiro de 2005 até Dezembro de 2011. Com base nos dados anemométricos construíram-se histogramas, que representam graficamente a frequência de dados em colunas, a rosa dos ventos, que mostra graficamente a frequência dos ventos para cada uma das direções: Norte (N), Sul (S), Leste (L) e Oeste (O) e calculou-se a distribuição de Weibull e seus parâmetros através do programa WasP® - Wind Atlas Analysis and Application Program. As medidas foram agrupadas bimestralmente, obtendo a estatística sazonal dos ventos. A análise revelou predominância de ventos na direção Sudeste (SE) para o Primeiro, Segundo, Quarto e Quinto bimestres, e Nordeste (NE) para o Terceiro e Quarto bimestres. Analisando o anemômetro que esta situado a 25 metros de altitude temos que os valores de densidade de potência (P) são maiores no Terceiro e Quarto bimestres e o fator de escala (A) da distribuição de Weibull foi maior durante o Quarto e Quinto bimestres, enquanto o fator de forma (k) foi maior no Primeiro e Quinto bimestres. As análises de rugosidade (z) do terreno mostram valores demasiadamente altos para as características locais. Dessa forma, há necessidade de uma avaliação mais detalhada da série de dados, objetivando uma maior confiabilidade dos resultados por meio de consideração de fatores associados à estabilidade atmosférica que podem afetar os resultados obtidos.



## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>1</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>10</b>
<b>SIGLAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>12</b>
INTRODUÇÃO .....	12
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>14</b>
INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA.....	14
2.1. <i>O Projeto SONDA .....</i>	<i>14</i>
2.2. <i>Estação SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul.....</i>	<i>15</i>
2.3. <i>Laboratório de Recursos de Energia Renováveis – LRER/CRS/CCR/INPE - MCTI.....</i>	<i>19</i>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>20</b>
ENERGIA EÓLICA.....	20
3.1. <i>Histórico da Energia Eólica.....</i>	<i>20</i>
3.2. <i>Panorama da Energia Eólica .....</i>	<i>22</i>
3.3. <i>Potencial Eólico Brasileiro .....</i>	<i>23</i>
3.4. <i>Potencial eólico do Rio Grande do Sul .....</i>	<i>24</i>
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>26</b>
VENTO.....	26
4.1. <i>O Vento – Características gerais.....</i>	<i>26</i>
4.1.1. <i>Força de Gradiente de Pressão .....</i>	<i>26</i>
4.1.2. <i>Força de Coriolis.....</i>	<i>28</i>
4.1.3. <i>Força de Atrito .....</i>	<i>31</i>
4.2. <i>Avaliação e Análise dos dados de vento.....</i>	<i>31</i>
4.2.1. <i>Distribuição de frequências dos dados eólicos.....</i>	<i>31</i>
4.2.2. <i>Comprimento de Rugosidade .....</i>	<i>36</i>
AEROGERADORES.....	40
5.1. <i>Conversão da Energia do Vento em Energia Mecânica .....</i>	<i>40</i>
5.2. <i>Principais Componentes de um Aerogerador.....</i>	<i>43</i>
5.3. <i>Modos de Operação de um Aerogerador .....</i>	<i>45</i>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>47</b>
ENERGIA HIDRÁULICA .....	47
6.1. <i>Histórico da Energia Hidráulica.....</i>	<i>47</i>
6.2. <i>Potencial Hidráulico Brasileiro .....</i>	<i>48</i>
6.3. <i>Climatologia de Precipitação da Região Sul do Brasil.....</i>	<i>50</i>
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>52</b>
ATIVIDADES DESENVOLVIDAS .....	52
7.1. <i>Manutenção dos equipamentos da estação SONDA – SMS.....</i>	<i>52</i>
7.2. <i>Coleta, Redução e Análise dos Dados da estação SONDA – SMS.....</i>	<i>53</i>
<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>55</b>



*Relatório Final de Atividades, 2012*

METODOLOGIA APLICADA AOS DADOS DE VENTO .....	55
8.1. <i>Obtenção dos dados de ventos</i> .....	55
8.2. <i>Estudo do comportamento anual e sazonal do regime de ventos</i> .....	56
8.3. <i>Cálculo do comprimento de rugosidade do local</i> .....	57
<b>CAPÍTULO 9.....</b>	<b>58</b>
RESULTADOS .....	58
9.1. <i>Comportamento anual e sazonal do regime de ventos</i> .....	58
9.2. <i>Cálculo do comprimento de rugosidade do local</i> .....	60
<b>CAPÍTULO 10.....</b>	<b>61</b>
CONCLUSÃO .....	61
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</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.....	13
Figura 2.1.Mapa com as localizações das estações SONDA no Território Brasileiro.Fonte: SONDA, 2011.....	15
Figura 2.2.Estação solarimétrica e anemométrica SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.....	16
Figura 2.3.Torre Anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCTI. Em destaque o posicionamento dos anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros.....	17
Figura 3.1.Moinho de vento típico da Holanda. Fonte: CRESESB, 2008.....	20
Figura 3.2. (a) Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo. (b)Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1980 e 2002.Fonte: Gasche Twele, 2002.....	22
Figura 3.3.Prognóstico para o crescimento das fontes renováveis na matriz elétrica mundial. Fonte: EREC, 2004.....	23
Figura 3.4.Velocidade média do vento a altura de 50 metros no Território Brasileiro.Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.....	24
Figura 3.5.Vento médio anual a 50 metros de altura no Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Eólico: Rio Grande do Sul, 2002.....	25
Figura 4.1.Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido. Fonte: Grimm, 1999.....	27
Figura 4.2.Sistema de coordenadas fixo à Terra (Sistema não-inercial).Fonte: Grimm, 1999.....	28
Figura 4.3.Componentes da Força de Coriolis. Fonte: Grimm, 1999.....	30
Figura 4.4.O Efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul.Fonte: Grimm, 1999.....	30
Figura 4.5.Evidência do efeito da força de Coriolis em função da latitude. Fonte: Amêndola, 2007.....	31

Figura 4.6.Exemplo de distribuição estatística para dados de ventos.Fonte: Carvalho, 2003.....	32
Figura 4.7.Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh. Fonte: Carvalho, 2003.....	34
Figura 4.8.Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Manwell, et al., 2002.....	35
Figura 4.9.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.....	38
Figura 4.10.Modelo de rugosidade sobreposto ao relevo sombreado.Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.....	39
Figura 5.1. <b>Variação da massa através da área de varredura.</b> Fonte: Marques (2004).....	41
Figura 5.2. <b>Variação da velocidade do vento através do rotor da turbina.</b> Fonte: Marques (2004).....	42
Figura 5.3. <b>Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica.</b> Fonte: Carvalho (2003).....	42
Figura 5.4. <b>Velocidade Específica para diferentes tipos de turbinas eólicas.</b> Fonte: Marques (2004).....	43
Figura 5.5.Principais componentes de um Aerogerador. Fonte: Amêndola (2007).....	43
Figura 5.6. <b>Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador.</b> Fonte: Amêndola (2007).....	45
Figura 6.1.Potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica situação em março de 2003. Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005.....	49
Figura 6.2.Precipitação Média Anual no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul.....	51
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 – MCTI.....	53
Figura 7.2.Diagrama da configuração local dos equipamentos instalados na estação SONDA – SMS.Fonte: SONDA, 2011.....	53



Figura 8.1. Anemômetro R. M. Young modelo 05106. Fonte: Campbellsci, 2009.....	56
Figura 8.2. Equipamento de medida de dados eólicos da estação SONDA – SMS, instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCTI.....	56
Figura 9.1. Distribuição estatística Anual dos ventos a 25m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCTI.....	58
Figura 9.2. Distribuição estatística Anual dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCTI.....	58



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 4.1. Classificação da rugosidade de superfícies típicas. Fonte: Krohn, S., 2001.....	39
Tabela 9.1. Parâmetros da análise estatística dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.....	59
Tabela 9.2. Análise estatística sazonal dos ventos em suas direções predominantes a 25 e 50 metros.....	59



## **SIGLAS E ABREVIATURAS**

AERONET - *AErosol RObotic NETwork*  
AWEA – *American Wind Energy Association*  
BSRN - *Baseline Surface Radiation Network*  
CCD - *Charge Coupled Device*  
CCST - Centro de Ciência do Sistema Terrestre  
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
CRS - Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais  
EREC – *European Renewable Energy Council*  
EWEA – *European Wind Energy Association*  
GWEC – *Global Wind Energy Council*  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*  
LACESM - Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria  
LIM – Laboratório de Instrumentação Meteorológica  
LRER - Laboratório de Recursos de Energia Renováveis  
MBE - *Mean Bias Error*  
MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia  
NIP - *Normal Incidence Pyrheliometer*  
NIR - *Near Infra Red*  
OES - Observatório Espacial do Sul  
PAR - *Photosynthetically Active Radiation*  
PC - *Personal Computer*  
PIR – *Precision Infrared Radiometer*  
PMOA - Programa de Monitoramento do Ozônio Atmosférico  
RMSE - *Root Mean Square Error*  
SMS - São Martinho da Serra  
SONDA - Sistema de Organização de Dados Ambientais  
TSI - *Total Sky Imager*  
UFMS - Universidade Federal de Santa Maria  
USB – *Universal Serial Bus*  
WMO - *World Meteorological Organization*

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O Brasil vem ao longo dos anos apresentando um grande crescimento nas atividades econômicas e juntamente com isso um aumento na qualidade de vida de sua população. Entretanto, para que esse ciclo de desenvolvimento não seja interrompido é preciso também um crescimento no suprimento de energia do país. Agregado a isso, o esgotamento dos recursos hídricos ainda não aproveitados e a influência da variabilidade climática tem comprometido a segurança energética do país (Pereira, 2006). Porém, a queima de combustíveis fósseis não é uma alternativa recomendada em razão das consequências ambientais relacionadas à emissão de gases do efeito estufa e danos ao meio ambiente. Dessa forma, torna-se necessário o emprego de formas alternativas e renováveis 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. A Figura 1.1 apresenta a atual conjuntura energética do Brasil.

No Brasil, a energia hidráulica é a principal fonte de energia para a geração de eletricidade, apesar de ser considerada uma fonte de energia limpa e renovável, sua implementação causa sérios impactos ambientais associados ao alagamento de grandes áreas resultando na alteração do uso de solo, deslocamento de populações ribeirinhas, prejuízos à fauna e flora entre outros (Pereira, 2006).

A fonte eólica e a solar vêm se expandindo rapidamente por todo o mundo como meio alternativo para a produção de energia elétrica, isso porque é de caráter renovável e baixo impacto ao meio ambiente. No entanto, a atração de investimentos e a realização de ações efetivas ao desenvolvimento tecnológico e científico de novas fontes energéticas requerem a realização de estimativas da disponibilidade e distribuição dos seus recursos ao longo do território nacional, além do estabelecimento de um banco de dados acessível e confiável.

Dentre as fontes energéticas “limpas”, a energia mecânica contida no vento vem se destacando e demonstra potencial para contribuir significativamente no atendimento dos requisitos necessários quanto aos custos de produção, segurança e sustentabilidade ambiental (GWEC, 2006).

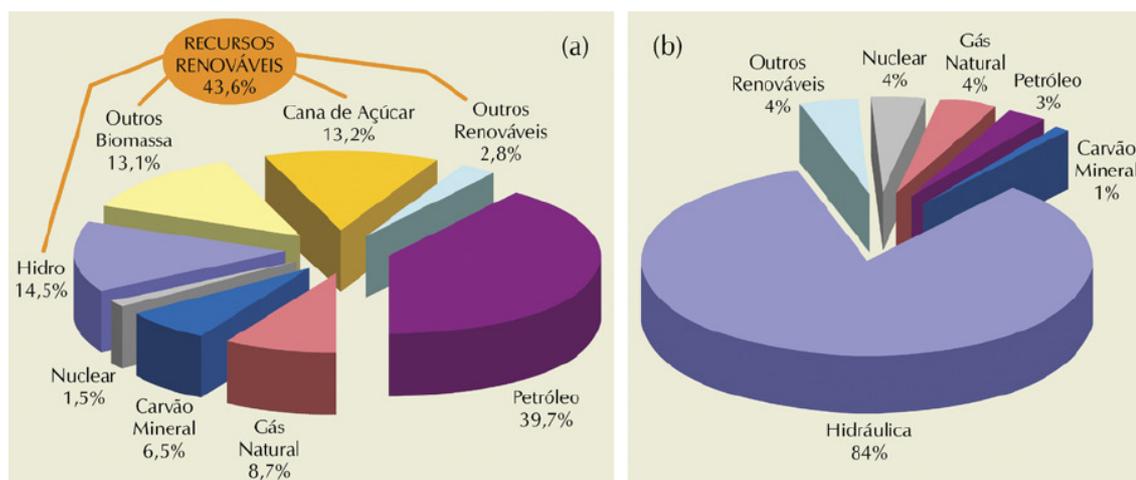


Figura 1.1.(a) Representação da matriz de oferta de energia primária brasileira; (b) Formas de energia utilizadas para a geração de eletricidade no Brasil. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

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

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

## CAPÍTULO 2

### INFRA-ESTRUTURA UTILIZADA

#### 2.1. O Projeto SONDA

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

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

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

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

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

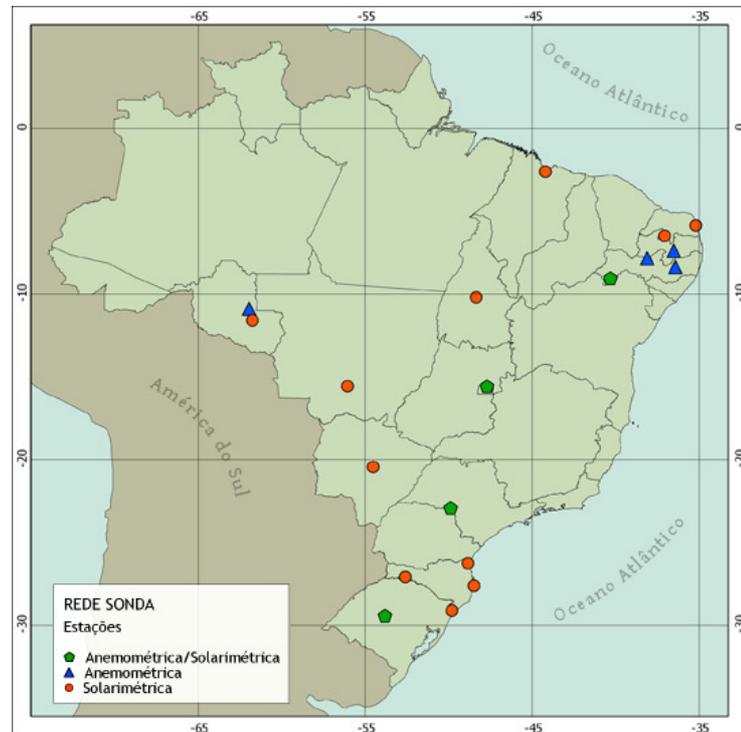


Figura 2.1. Mapa com as localizações das estações SONDA no Território Brasileiro. Fonte: SONDA, 2011.

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

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

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

A estação é constituída por uma plataforma de três metros de altura aterrada ao lado do Prédio 1 do Observatório Espacial do Sul, onde estão instalados os sensores solarimétricos e sensores meteorológicos do projeto SONDA, juntamente com os equipamentos do Programa

de Monitoramento do Ozônio Atmosférico (PMOA), conforme apresentado na Figura 2.2.



Figura 2.2. Estação solarimétrica e anemométrica SONDA – SMS instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS.

Além da plataforma, a estação SONDA-SMS possui uma torre anemométrica de 52 metros de altura mostrada na Figura 2.3, onde estão instalados 3 anemômetros para monitorar a velocidade e direção do vento horizontal em alturas padrões de 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.

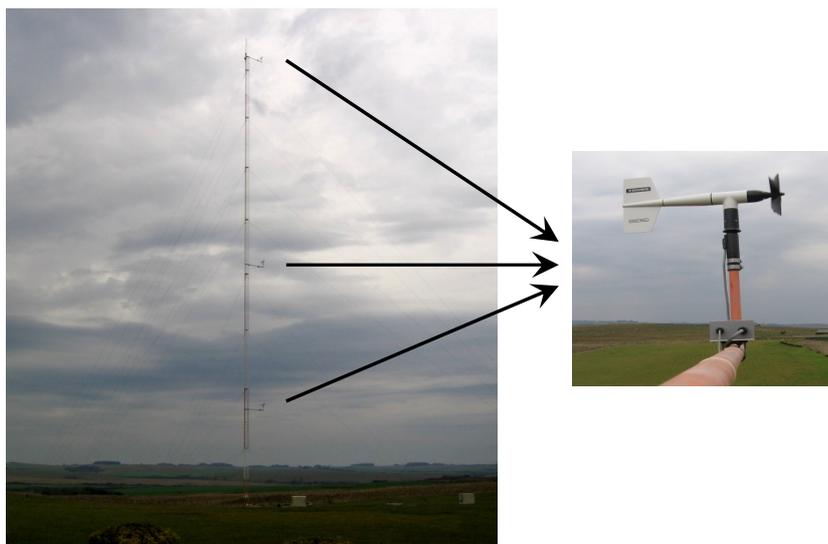


Figura 2.3. Torre Anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCTI. Em destaque o posicionamento dos anemômetros instalados a 10, 25 e 50 metros.

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

- Piranômetro CM 21 (*Kipp&Zonen*) – efetua medidas de radiação solar global na faixa de 300 a 2800 nm. Possui um sistema de ventilação CV 2 (*Kipp&Zonen*) para melhoramento de seu desempenho;
- Piranômetro CM 22 (*Kipp&Zonen*) – realiza medidas de radiação solar difusa na faixa de 200 a 3600 nm. Possui ocultador do disco solar acoplado a um “*Tracker 2AP*” para medir somente a radiação solar proveniente de outras direções, que não a direção do feixe solar;
- *Two Axis Positioner – 2AP* (*Kipp&Zonen*) – é um rastreador da posição do Sol de dois eixos que tem como finalidade ocultar os raios solares diretos para a realização das medidas de irradiação solar difusa e de radiação de onda longa; e também manter o pireliômetro direcionado para o Sol para coleta da radiação de incidência normal.
- Pireliômetro NIP (*Eppley Laboratory, Inc*) – trata-se de equipamento para medida de irradiância solar de incidência normal que efetua medidas de radiação solar direta em um plano normal à incidência de radiação, através do acompanhamento do sol ao ser acoplado ao “*Tracker2AP*”;
- Pirgeômetro PIR (*Eppley Laboratory, Inc*) – é um radiômetro para medida de irradiação solar na faixa espectral de infravermelho (radiação de onda longa).



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



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

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 – MCTI, junto ao campus da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, na cidade de Santa Maria, RS.

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

Os alunos participam das diversas etapas desde a coleta dos dados e manutenção da estação de referência SONDA - SMS, localizada no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS. Os dados coletados já 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: CRESESB, 2008.

Durante os séculos seguintes, as máquinas eólicas tiveram a sua aplicação grandemente expandida na Europa: na fabricação de papel para atender à demanda após a

invenção da imprensa, na produção de óleos vegetais e até em grandes projetos de drenagem (Eldridge, F. R., 1980). No entanto, com a expansão do uso de máquinas a vapor, no século XIX, os moinhos de vento europeus entraram gradualmente em desuso (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

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

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

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

Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (década de 1990), que o aproveitamento eólico-elétrico atingiu a escala de contribuição mais significativa, em termos de geração e economicidade (Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001).

A evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo e a evolução tecnológica dos aerogeradores entre 1980 e 2002 podem ser observados nas Figura 3.2 (a) e (b). A capacidade instalada total mundial de aerogeradores voltados à produção de energia elétrica atingiu 74223 MW ao final de 2006, apresentando um crescimento de mais de 20% em relação a 2005.

O Brasil totalizou a inserção de 921 MW de capacidade instalada ao fim de 2010 (Martins e Pereira, 2011). Esse acréscimo deve-se em grande parte à instalação dos parques

eólicos no estado do Rio Grande do Sul e estados do Nordeste do Brasil. O complexo eólico de Osório conta com 75 aerogeradores de 2 MW cada um, instalados em três parques eólicos, com capacidade de produzir 417 GWh por ano (Martins, F.R. et al., 2007).

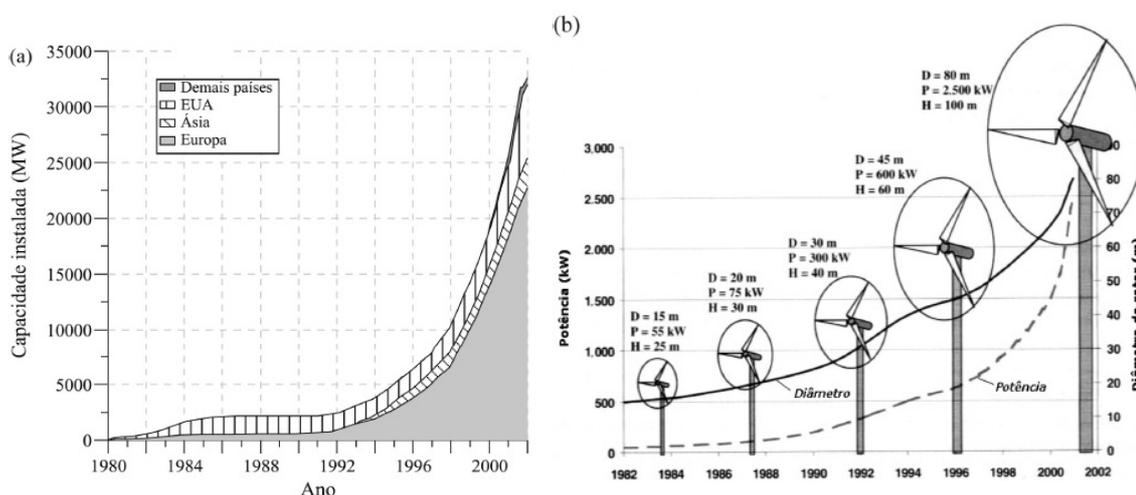


Figura 3.2. (a) Evolução da capacidade instalada de geração eólica de eletricidade no mundo. (b) Evolução tecnológica das turbinas eólicas comerciais (D = diâmetro, P = potência, H = altura) entre 1980 e 2002. Fonte: Gasche Twele, 2002.

### 3.2. Panorama da Energia Eólica

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

Para que a energia eólica seja considerada tecnicamente aproveitável, é necessário que sua densidade seja maior ou igual a  $500 \text{ W/m}^2$ , a uma altura de 50 m, o que requer uma velocidade mínima do vento de 7 a 8 m/s segundo a Organização Mundial de Meteorologia, em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a 7 m/s, a uma altura de 50 m. Mesmo assim, estima-se que o potencial eólico bruto mundial seja da ordem de 500.000 TWh por ano. Devido, porém, a restrições socioambientais, apenas 53.000 TWh (cerca de 10%) são considerados tecnicamente aproveitáveis. Ainda assim, esse potencial líquido corresponde a cerca de quatro vezes o consumo mundial de eletricidade.

O Conselho Global de Energia Eólica (GWEC) é uma organização não governamental

estabelecida em 2005 que associa as indústrias e estudiosos de energia eólica em nível internacional. Tal conselho estipulou meta para que, em 2020, 12% da eletricidade consumida no mundo seja de fonte eólica (1250 GW, que gerariam 3000 TWh em 2020) (EWEA, 2004).

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

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

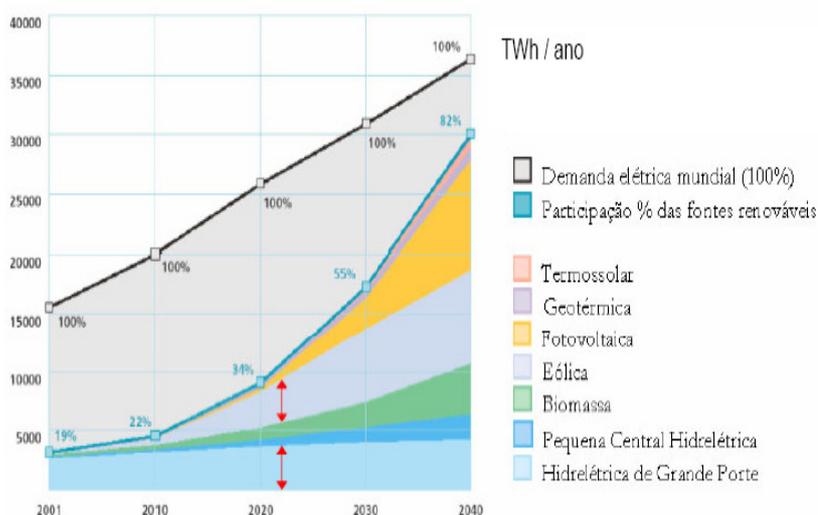


Figura 3.3. Prognóstico para o crescimento das fontes renováveis na matriz elétrica mundial. Fonte: EREC, 2004.

### 3.3. Potencial Eólico Brasileiro

O Brasil tem histórico dirigido à energia renovável, sendo líder mundial do setor, porém atravessa um momento crítico na oferta de energia para um desenvolvimento sustentado (Viterbo, J.C., 2008).

Embora ainda haja divergências entre especialistas e instituições na estimativa do potencial eólico brasileiro, vários estudos indicam valores extremamente consideráveis. Até

poucos anos, as estimativas eram da ordem de 20.000 MW. Hoje a maioria dos estudos indica valores maiores que 60.000 MW (energia eólica). A Figura 3.4 apresenta um mapa da velocidade média dos ventos a altura de 50 metros no Território Brasileiro.

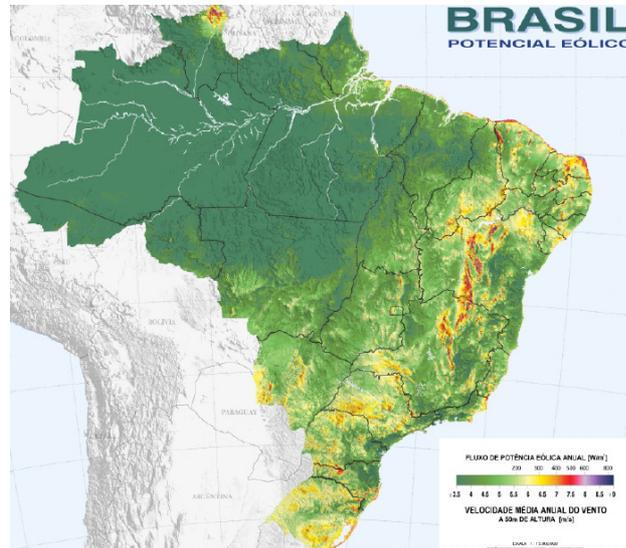


Figura 3.4. Velocidade média do vento a altura de 50 metros no Território Brasileiro. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

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

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

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

A depressão barométrica do nordeste da Argentina é uma área quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária a leste dos Andes, cuja posição anual média é de aproximadamente em 29°S e 66°O. Essa depressão é causada pelo bloqueio da circulação geral atmosférica imposto pela parede montanhosa dos Andes e acentuada pelo intenso aquecimento das planícies de baixa altitude da região.

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

de toda a região Sul do Brasil.

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

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

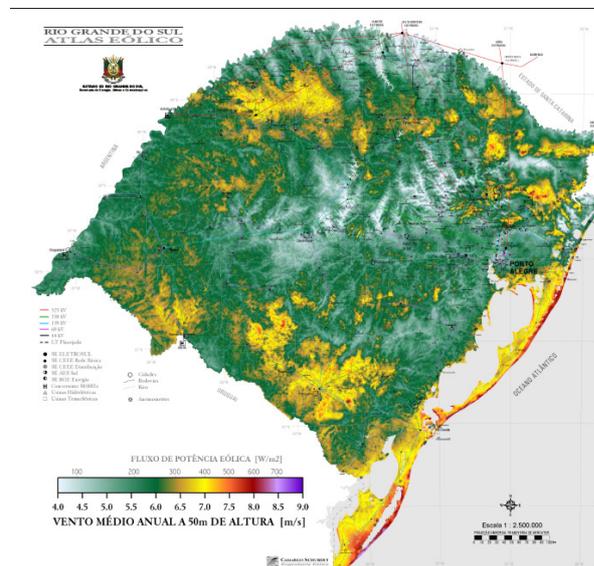


Figura 3.5. Vento médio anual a 50 metros de altura no Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Eólico: Rio Grande do Sul, 2002.

## CAPÍTULO 4

### VENTO

#### 4.1. O Vento – Características gerais

O vento consiste na circulação de ar na atmosfera oriunda da energia solar. A radiação provoca um aquecimento diferencial das porções de ar, criando os gradientes de pressão, geradores dos ventos. Para seu estudo, os ventos podem ser divididos em duas componentes: uma horizontal – Leste-Oeste ou Norte-Sul – e uma vertical – para cima e para baixo. Embora o comportamento vertical seja importante, principalmente para o processo de formação das nuvens, a componente horizontal é muito mais forte. Por conveniência, neste estudo, o termo “vento” será empregado apenas para denominar os movimentos horizontais.

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

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

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

##### 4.1.1. Força de Gradiente de Pressão

Um gradiente de pressão existe quando a pressão do ar varia de uma região para outra. Se um elemento de fluido está sujeito a uma pressão maior de um lado em relação ao outro, a variação espacial de pressão ocasiona o surgimento de uma força, no sentido de promover um equilíbrio de pressão. Para deduzir a expressão dessa força, pode-se considerar um pequeno bloco de fluido com dimensões  $\Delta n$ ,  $\Delta s$  e  $\Delta z$ , como ilustra a Figura 4.1. O sistema de coordenadas é tal que o eixo  $s$  é paralelo às isóbaras, o eixo  $n$  aponta na direção da pressão mais alta e o eixo  $z$  aponta para cima. A força da pressão exercida pelo ar ambiente sobre a

face esquerda do bloco é  $p\Delta s\Delta z$ , onde  $p$  é a pressão sobre esta face. Na face oposta, há uma força oposta, devido à pressão do ar ambiente, dada por  $(p+\Delta p)\Delta s\Delta z$ . Supondo que  $\Delta n$  seja suficientemente pequeno para que se possa considerar que a taxa de variação da pressão com a distância,  $\partial p/\partial n$ , seja constante sobre  $\Delta n$ , pode-se escrever:

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

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

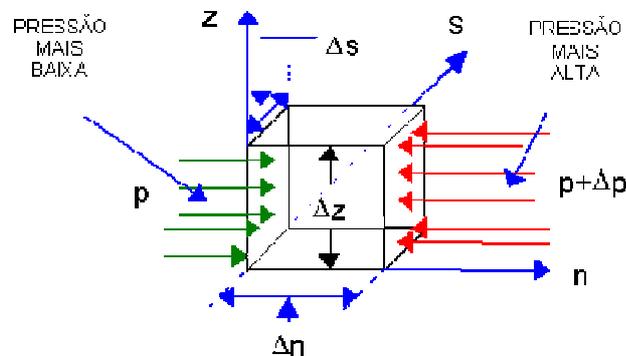


Figura 4.1. Pressão horizontal atuando sobre uma pequena parcela de fluido. Fonte: Grimm, 1999.

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

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

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

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

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

#### 4.1.2. Força de Coriolis

A Lei de Newton da dinâmica é válida apenas para sistemas de coordenadas inerciais. Ao se estudar movimentos em um sistema de referência não inercial, surgem forças aparentes, decorrentes das acelerações experimentadas pelo sistema de coordenadas. Em geral, para facilitar o estudo dos movimentos atmosféricos, adota-se um sistema de coordenadas fixo à superfície terrestre, como apresentado na Figura 4.2, que, devido à rotação da Terra sobre seu eixo, constitui-se em um sistema não inercial. Assim, decorrentes da aceleração centrípeta da rotação terrestre, surgem duas forças aparentes que agem sobre as parcelas de ar: a Força de Coriolis e a Força centrífuga.

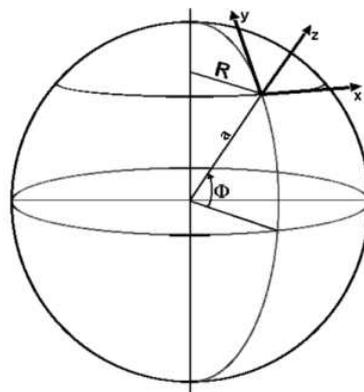


Figura 4.2. Sistema de coordenadas fixo à Terra (Sistema não-inercial). Fonte: Grimm, 1999.

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

A força de Coriolis atua paralelamente à superfície da Terra, somente sobre corpos – ou parcelas de ar – em movimento, em relação ao sistema fixo à superfície. Atua sempre em

direção perpendicular ao movimento, de modo a alterar apenas a direção do movimento.

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

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

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

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

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:

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

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

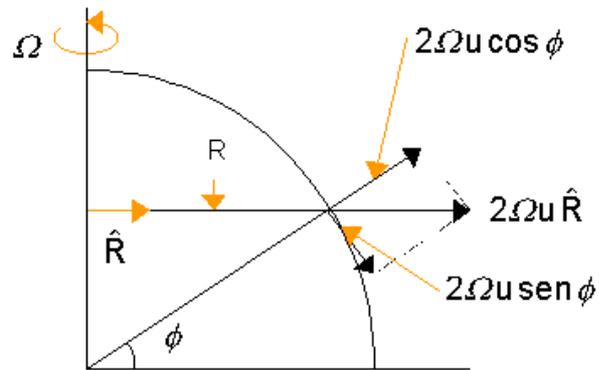


Figura 4.3. Componentes da Força de Coriolis. Fonte: Grimm, 1999.

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

A força de Coriolis é sempre perpendicular à direção do movimento, induzindo desvio para a direita no Hemisfério Norte e para a esquerda no Hemisfério Sul. Esse desvio é diretamente proporcional à velocidade do vento. Considerando um deslocamento no sentido polo Norte - equador, observa-se que ocorre um desvio para a direita do percurso, devido à rotação anti-horária do Hemisfério Norte, visto do espaço conforme ilustra a Figura 4.4.

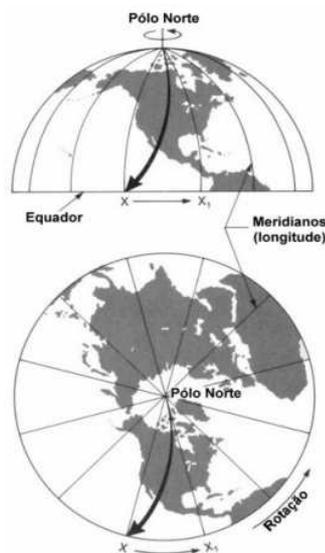


Figura 4.4. O Efeito de Coriolis para um deslocamento Norte-Sul. Fonte: Grimm, 1999.

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

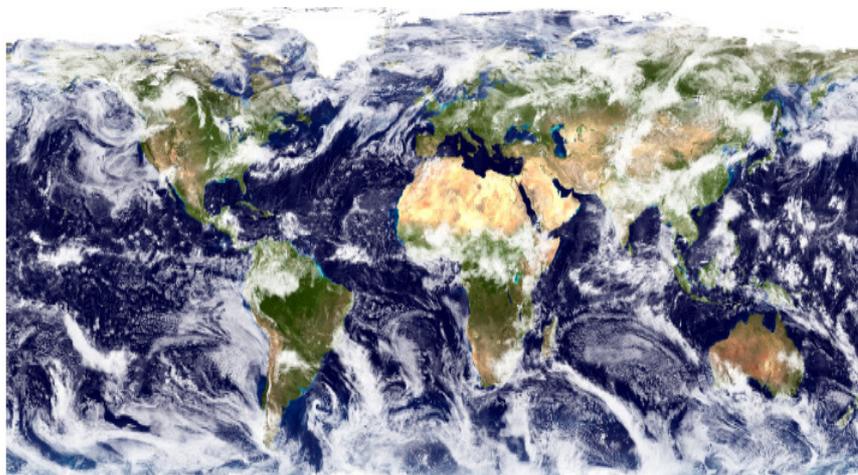


Figura 4.5. Evidência do efeito da força de Coriolis em função da latitude. Fonte: Amêndola, 2007.

#### 4.1.3. Força de Atrito

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

## 4.2. Avaliação e Análise dos dados de vento

### 4.2.1. 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

idades, de maneira que essas informações são úteis apenas para aplicações meteorológicas, podendo apresentar inconsistências para levantamentos de potenciais eólicos. Por isso, é de extrema importância realizar uma validação e análise dos dados obtidos antes de empregá-los em estimativas de potenciais eólicos.

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

Para a realização do cálculo da produção estimada de eletricidade, é necessário o uso de um histograma ou diagrama de frequências de ocorrência de velocidade do vento, gerado com dados previamente validados, decorrentes das medições realizadas. No histograma, os valores medidos de velocidade do vento são agrupados em intervalos de valores, denominados classes. A Figura 4.6 ilustra um exemplo de histograma construído com dados de ventos coletados por anemômetros na costa do Ceará a 50 metros de altitude.



Figura 4.6. 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) do gerador eólico a ser utilizado e da distribuição estatística da velocidade do vento no local da instalação, a produção total de energia elétrica pode ser estimada através da equação (Gasch, R., 1996):

$$E_{\text{Total}} = \sum f_i P_i T \quad (4.8)$$

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):

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (4.9)$$

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

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

Outro aspecto importante é o período de medição da velocidade do vento, quanto maior o período, maior a confiança nas informações obtidas. Através de longas séries de medições de alta qualidade podem ser verificados importantes aspectos, como a variação sazonal, anual e interanual da velocidade do vento. De modo geral, recomenda-se a medição de dados eólicos de um determinado local por um período de no mínimo um ano.

É importante salientar que erros no levantamento do histograma de frequência da velocidade do vento, além de influenciarem negativamente na avaliação da produção de energia elétrica, irão se refletir na análise econômica do projeto, podendo significar inclusive o fracasso do empreendimento do ponto de vista do retorno do investimento realizado.

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

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

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

(4.10)

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

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

(4.11)

Uma das vantagens dessa distribuição é a necessidade de apenas um parâmetro para a definição da distribuição, possibilitando o uso em locais que tenham disponíveis apenas valores médios de velocidade do vento, permitindo, dessa forma, a realização de prognósticos aproximados da produção futura de energia elétrica. Uma importante observação é que os cálculos referentes à produção de eletricidade que se encontram nos folhetos dos fabricantes de turbinas eólicas fundamentam-se comumente na hipótese de uma distribuição de Rayleigh para os ventos, pois esta se adapta bem ao regime de ventos europeu, continente onde se localiza a maior parte dos fabricantes. A Figura 4.7 mostra um histograma de frequência aproximado por uma distribuição de Rayleigh.

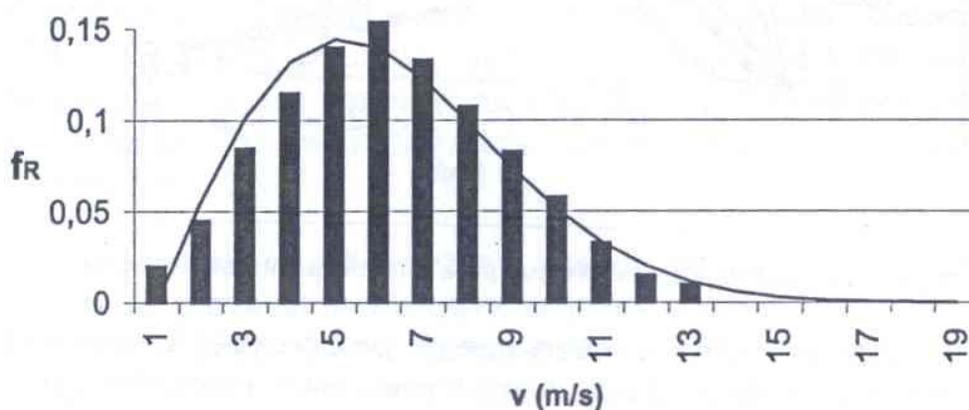


Figura 4.7. Aproximação de histograma por uma distribuição de Rayleigh. Fonte: Carvalho, 2003.

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

A distribuição de Weibull é calculada através de:

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

(4.12)

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

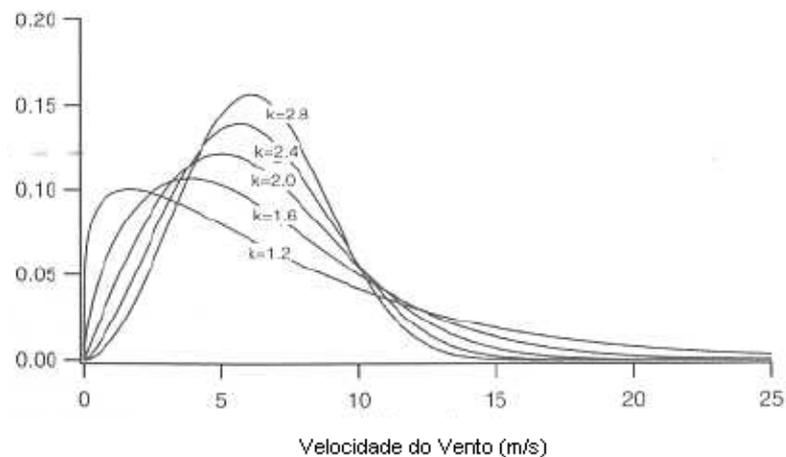


Figura 4.8. Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Manwell, et al., 2002.

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

$$S = \frac{\sigma}{v_{med}}$$

(4.13)

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

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

(4.14)

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

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

#### 4.2.2. Comprimento de Rugosidade

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

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

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 4.9 (Martins, F.R. et al., 2007).

Devido à dificuldade de medição da velocidade do vento em diversas alturas, utilizam-se modelos para descrever o perfil de velocidade na camada limite utilizando Prandtl

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

$$v(z) = \frac{v^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4.15)$$

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 4.16

$$v(h) = v_{ref} \cdot \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_{ref}}{z_0}\right)} \quad (4.16)$$

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

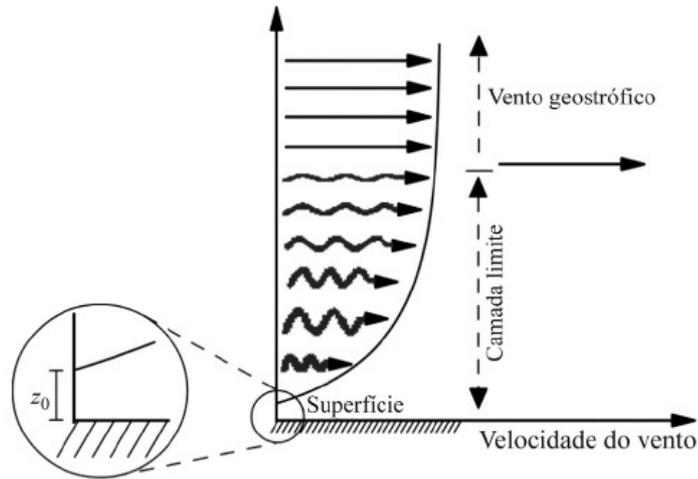


Figura 4.9. Perfil vertical da velocidade do vento desde a superfície até a altura do vento geostrófico. O comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) é a altura na qual a velocidade é nula. Fonte: Martins, F.R. et al., 2007.

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

$$v(h) = v_{ref} \cdot \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^\alpha \quad (4.17)$$

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 4.1. A lei de potência varia com parâmetros como altura, tempo do dia, estação, terreno, temperatura, vento, etc. Uma correlação com este modelo e o comprimento de rugosidade é determinada por (Manwillet al., 2002):

$$\alpha = 0,096 \cdot \log z_0 + 0,016 \cdot (\log z_0)^2 + 0,24 \quad (4.18)$$

Tabela 4.1. 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 4.10. Modelo de rugosidade sobreposto ao relevo sombreado. Fonte: Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, 2001.

## 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.

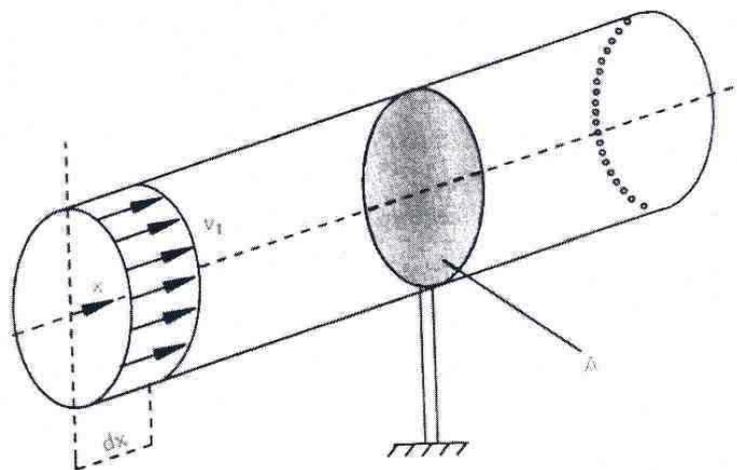


Figura 5.1. **Varição da massa através da área de varredura.** Fonte: Marques (2004).

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).

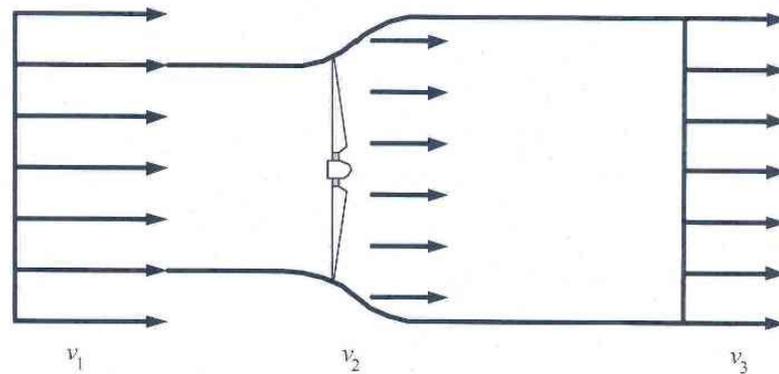


Figura 5.2. **Varição da velocidade do vento através do rotor da turbina.** Fonte: Marques (2004).

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).

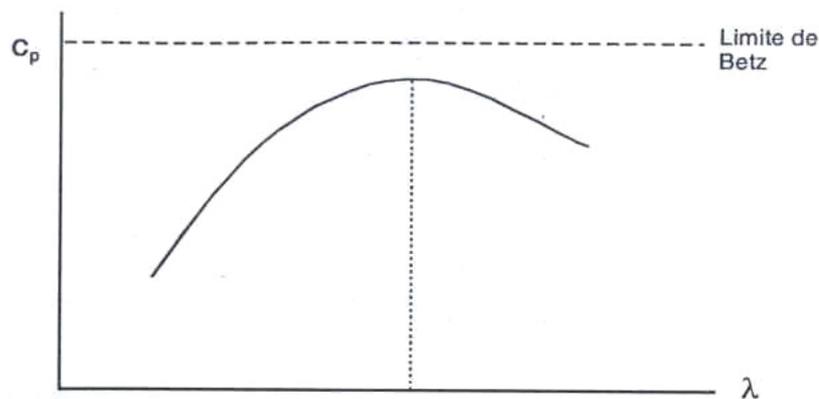


Figura 5.3. **Relação entre coeficiente de potência e velocidade específica.** Fonte: Carvalho (2003).

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.

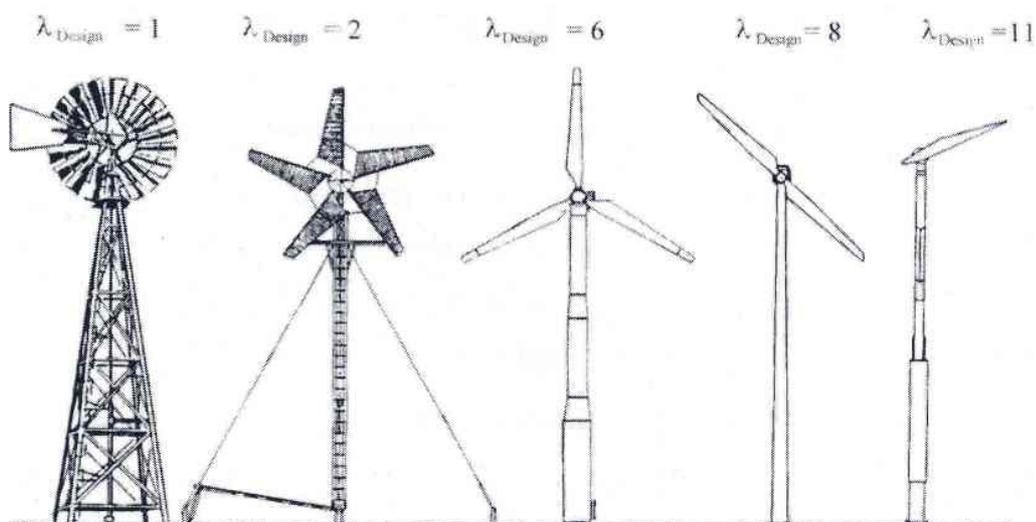


Figura 5.4. **Velocidade Específica para diferentes tipos de turbinas eólicas.** Fonte: Marques (2004).

## 5.2. Principais Componentes de um Aero gerador

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

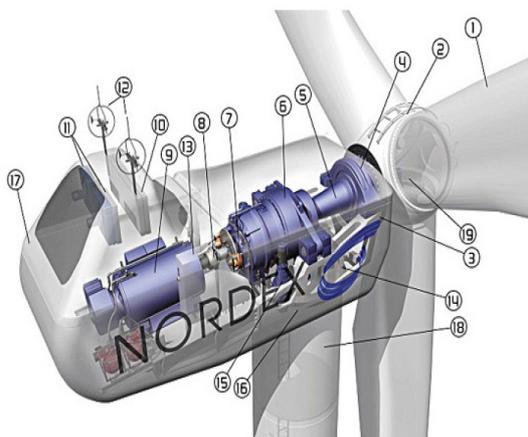


Figura 5.5. Principais componentes de um Aero gerador. Fonte: Amêndola (2007).

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

1. *Pás da turbina* – De maneira geral, captam a energia cinética do vento e a convertem em conjugado mecânico.
2. *Cubo da turbina* – Peça robusta, feita de ferro fundido, que une as pás em torno do eixo da turbina.

3. *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.
4. *Rolamento do Eixo da Turbina* – Rolamento com duas carreiras de esferas (ou roletes), instalados em um mancal de mesmo material da carcaça da nacele.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. *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.
9. *Gerador* – Converte o conjugado mecânico fornecido pela turbina em energia elétrica, podendo ser de vários tipos e apresentar diversas configurações de instalação.
10. *Radiador de Calor da Transmissão* – Componente do sistema de refrigeração da caixa de transmissão.
11. *Radiador de Calor do Gerador* – Componente do sistema de refrigeração do gerador.
12. *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.
13. *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.
14. *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.

15. *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.
16. *Rolamento da Nacele* – Instalado entre a nacele e a torre, permite a sua rotação em torno do eixo longitudinal da torre.
17. *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.
18. *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.
19. *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.

Para entender-se melhor o funcionamento dos aerogeradores, pelo menos o suficiente para elaborar um sistema de controle eficaz, é necessário examinar em maior profundidade seus principais componentes internos e suas inter-relações.

### **5.3. Modos de Operação de um Aerogerador**

As turbinas eólicas operam sob um certo intervalo de velocidades do vento, extraindo do escoamento quantidades particulares de potência para cada velocidade, de acordo com a curva apresentada na Figura 5.6. 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.

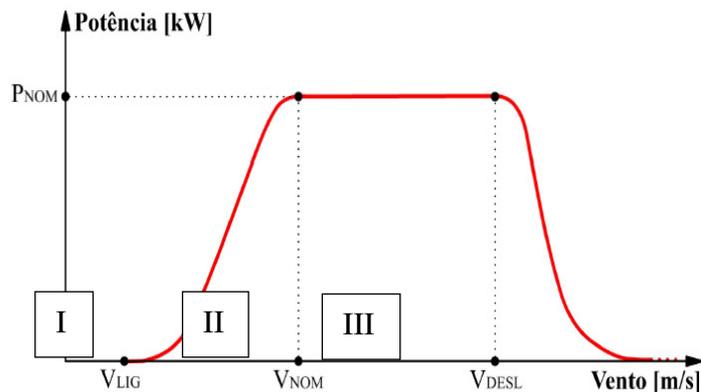


Figura 5.6. Intervalos de velocidade de vento para operação de um Aerogerador.

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

### ENERGIA HIDRÁULICA

#### **6.1. Histórico da Energia Hidráulica**

O uso da energia hidráulica foi uma das primeiras formas de substituição do trabalho animal pelo mecânico, particularmente para bombeamento de água e moagem de grãos. Tinha a seu favor, para tanto, as seguintes características: disponibilidade de recursos, facilidade de aproveitamento e, principalmente, seu caráter renovável (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005).

A energia hidráulica resulta da irradiação solar e da energia potencial gravitacional, que provocam a evaporação, condensação e precipitação da água sobre a superfície terrestre. Ao contrário das demais fontes renováveis, representa uma parcela significativa da matriz energética mundial e possui tecnologias de aproveitamento devidamente consolidadas. Atualmente, é a principal fonte geradora de energia elétrica para diversos países e responde por cerca de 17% de toda a eletricidade gerada no mundo (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005).

No Brasil, água e energia têm uma histórica interdependência. A contribuição da energia hidráulica ao desenvolvimento econômico do País tem sido expressiva, seja no atendimento das diversas demandas da economia – atividades industriais, agrícolas, comerciais e de serviços – ou da própria sociedade, seja na melhoria do conforto das habitações e da qualidade de vida das pessoas. Também desempenha papel importante na integração e no desenvolvimento de regiões distantes dos grandes centros urbanos e industriais (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005).

A contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional, segundo o Balanço Energético Nacional (2003), é da ordem de 14%, participando com quase 83% de toda a energia elétrica gerada no País. Apesar da tendência de aumento de outras fontes, devido a restrições socioeconômicas e ambientais de projetos hidrelétricos e aos avanços tecnológicos no aproveitamento de fontes não-convencionais, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil. Embora os maiores potenciais remanescentes estejam localizados em regiões com fortes restrições ambientais e distantes dos principais centros consumidores, estima-se que, nos

próximos anos, pelo menos 50% da necessidade de expansão da capacidade de geração seja de origem hídrica (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005).

As políticas de estímulo à geração descentralizada de energia elétrica promovem uma crescente participação de fontes alternativas na matriz energética nacional, e nesse contexto, as pequenas centrais hidrelétricas terão certamente um papel importante a desempenhar (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005).

## **6.2. Potencial Hidráulico Brasileiro**

O valor do potencial hidrelétrico brasileiro é composto pela soma da parcela estimada (remanescente + individualizada) com a inventariada. (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005)

O potencial estimado é resultante da somatória dos estudos:

- De potencial remanescente - resultado de estimativa realizada em escritório, a partir de dados existentes - sem qualquer levantamento complementar - considerando-se um trecho de um curso d'água, via de regra situado na cabeceira, sem determinar o local de implantação do aproveitamento;
- Individualizados - resultado de estimativa realizada em escritório para um determinado local, a partir de dados existentes ou levantamentos expeditos, sem qualquer levantamento detalhado. A parcela inventariada inclui usinas em diferentes níveis de estudos - inventário, viabilidade e projeto básico - além de aproveitamentos em construção e operação (ELETROBRÁS, 2004).

O potencial inventariado é resultante da somatória dos aproveitamentos:

- Apenas em inventário - resultado de estudo da bacia hidrográfica, realizado para a determinação do seu potencial hidrelétrico, mediante a escolha da melhor alternativa de divisão de queda, que constitui o conjunto de aproveitamentos compatíveis, entre si e com projetos desenvolvidos, de forma a se obter uma avaliação da energia disponível, dos impactos ambientais e dos custos de implantação dos empreendimentos;
- Com estudo de viabilidade - resultado da concepção global do aproveitamento, considerada sua otimização técnico-econômica, de modo a permitir a elaboração dos documentos para licitação. Esse estudo compreende o dimensionamento das estruturas principais e das obras de

infra-estrutura local e a definição da respectiva área de influência, do uso múltiplo da água e dos efeitos sobre o meio ambiente;

- Com projeto básico - aproveitamento detalhado e em profundidade, com orçamento definido, que permita a elaboração dos documentos de licitação das obras civis e do fornecimento dos equipamentos eletromecânicos;
- Em construção - aproveitamento que teve suas obras iniciadas, sem nenhuma unidade geradora em operação;
- Em operação - os empreendimentos em operação constituem a capacidade instalada.

Os aproveitamentos somente são considerados para fins estatísticos nos estágios “inventário”, “viabilidade” ou “projeto básico”, se os respectivos estudos tiverem sido aprovados pelo poder concedente.

O potencial hidrelétrico brasileiro situa-se ao redor de 260 GW. Contudo apenas 68% desse potencial foi inventariado (Figura 6.1). Entre as bacias com maior potencial destacam-se as do Rio Amazonas e do Rio Paraná. Na Bacia do Amazonas, destaca-se a sub-bacia do Rio Xingu, com 12,7% do potencial inventariado no País. Outras sub-bacias do Amazonas, cujos potenciais estimados são consideráveis, são a do Rio Tapajós, a do Rio Madeira e a do Rio Negro. Na Bacia do Tocantins, destaca-se a sub-bacia do Rio Itacaiunas e outros, com 6,1% do potencial brasileiro inventariado. Na Bacia do São Francisco, o destaque vai para a sub-bacia do Rio São Francisco, Moxotó e Outro, que representa 9,9% do potencial inventariado. Na Bacia do Paraná, existem várias sub-bacias com grandes potenciais, entre elas a do Rio Paraná, Paranapanema e outros, com 8,1% do potencial hidrelétrico inventariado no País.

Bacia	Código	Estimado		Inventariado		Total (MW)	
		(MW)	% em relação ao total	(MW)	% em relação ao total	(MW)	% em relação ao total
Bacia do Rio Amazonas	1	64.164,49	78,8	40.883,07	23,0	105.047,56	40,6
Bacia do Rio Tocantins	2	2.018,80	2,5	24.620,65	13,9	26.639,45	10,3
Bacia do Atlântico Norte/Nordeste	3	1.070,50	1,3	2.127,85	1,2	3.198,35	1,2
Bacia do Rio São Francisco	4	1.917,28	2,4	24.299,84	13,7	26.217,12	10,1
Bacia do Atlântico Leste	5	1.779,20	2,2	12.759,81	7,2	14.539,01	5,6
Bacia do Rio Paraná	6	7.119,29	8,7	53.783,42	30,3	60.902,71	23,5
Bacia do Rio Uruguai	7	1.151,70	1,4	11.664,16	6,6	12.815,86	5,0
Bacia do Atlântico Sudeste	8	2.169,16	2,7	7.296,77	4,1	9.465,93	3,7
<b>Total</b>	-	<b>81.390,42</b>	<b>100</b>	<b>177.435,57</b>	<b>100</b>	<b>258.825,99</b>	<b>100</b>

Figura 6.1. Potencial hidrelétrico brasileiro por bacia hidrográfica situação em março de 2003. Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2005.

### **6.3. Climatologia de Precipitação da Região Sul do Brasil**

A distribuição anual das chuvas sobre o sul do Brasil se faz de forma bastante uniforme. Ao longo de quase todo seu território a média anual da precipitação varia de 1250 a 2000 mm. Somente algumas áreas encontram-se fora desse limite pluviométrico. Acima de 2000 mm incluem-se o litoral do Paraná, o oeste de Santa Catarina e a área em torno de São Francisco de Paula, no Rio Grande do Sul. Valores abaixo de 1250 mm restringem-se ao litoral sul de Santa Catarina e ao norte do Paraná (Nimer, 1979).

Conclui-se que o relevo, por suas características gerais suaves, não exerce grande influência na distribuição pluviométrica. A temperatura, por sua vez, exerce um papel no mesmo sentido da precipitação, reforçando a uniformização climática no sul do país. No entanto, essa é a Região do Brasil com maior variabilidade térmica no decorrer do ano.

Com relação às precipitações, o Estado do Rio Grande do Sul apresenta uma distribuição relativamente equilibrada das chuvas ao longo de todo o ano, em decorrência das massas de ar oceânicas que penetram no Estado.

O volume de chuvas no entanto é diferenciado. Ao sul a precipitação média situa-se entre 1.299 e 1.500mm e, ao norte a precipitação média está entre 1.500 e 1.800mm, com intensidade maior de chuvas à nordeste, especialmente na encosta do planalto, local com maior precipitação no Estado (Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul).

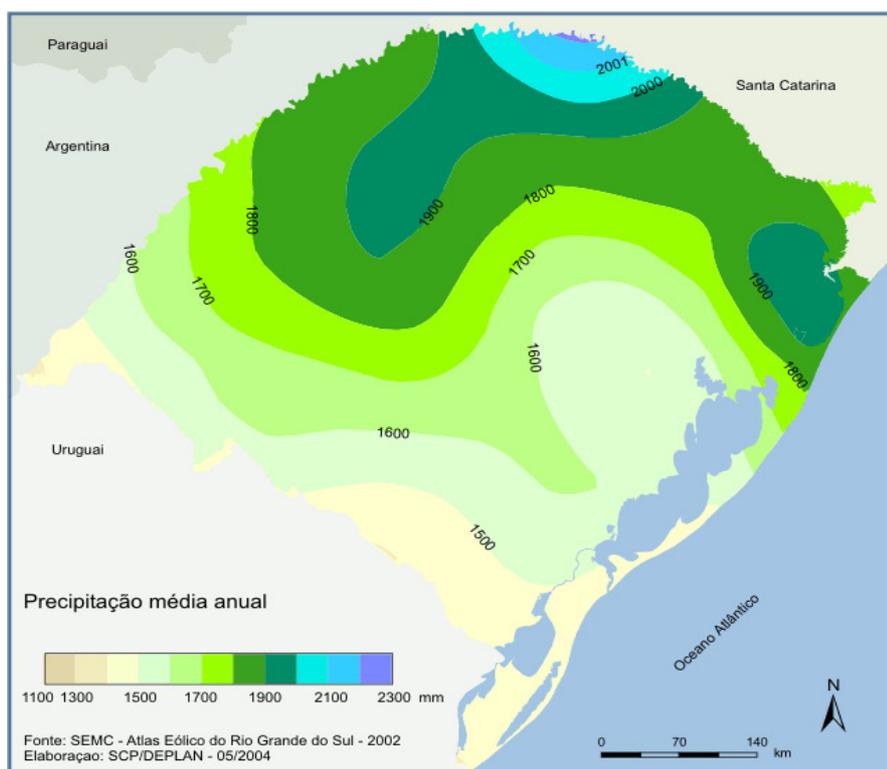


Figura 6.2. Precipitação Média Anual no Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul

## CAPÍTULO 7

### ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

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

A manutenção dos equipamentos tem como principal objetivo reduzir ou evitar a perda de dados e do desempenho dos mesmos, visto que é de extrema importância a obtenção de dados com alto grau de confiabilidade. Visitas periódicas são realizadas pelos integrantes do Laboratório de Recursos de Energia Renováveis com o intuito de manter a conservação física dos sensores resultando numa baixa probabilidade de falhas.

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

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

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

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





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

Os dados do Datalogger, localizado no interior do Prédio 1 do OES/CRS/CCR/INPE – MCTI 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 – MCTI, 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 – MCTI.

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.

## CAPÍTULO 8

### METODOLOGIA APLICADA AOS DADOS DE VENTO

#### 8.1. Obtenção dos dados de ventos

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

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

O anemômetro, mostrado na Figura 8.1, é instalado sobre uma haste vertical que o mantém afastado 1,5 metros em relação à torre eólica, como mostrado na Figura 8.2. A direção do vento é determinada por um potenciômetro. Para uma voltagem constante de excitação aplicada ao potenciômetro, o sinal de saída é uma voltagem analógica diretamente proporcional ao ângulo azimutal.

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



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



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

## 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 Dezembro de 2011 conforme coletados pelos anemômetros instalados nas alturas de 25 e 50 metros na estação SONDA - SMS.

Os dados para cada altura de anemômetro foram agrupados ano a ano e também todos os anos juntos, fazendo uma análise anual do perfil da região. Posteriormente, agruparam-se as medidas de cada anemômetro de modo bimestral, a fim de se obter o potencial sazonal e observando o seu comportamento exclusivamente nas direções predominantes.

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

Os valores médios da velocidade do vento e da densidade de potência, bem como os

parâmetros da função de Weibull foram comparados nas diferentes análises.

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

Para este estudo utilizou-se dados de janeiro de 2005 a dezembro de 2011, coletados pelos anemômetros instalados nas alturas de 25 e 50 metros na estação SONDA - SMS.

Isolando-se o comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ) na Equação 8.1:

$$v(h) = v_{ref} \cdot \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad (8.1)$$

Obtém-se a Equação 8.2:

$$Z_0 = e^{\frac{v(h) \cdot \ln h_{ref} - v_{ref} \cdot \ln h}{v(h) - v_{ref}}} \quad (8.2)$$

A Equação 8.2 pode então ser empregada para calcular diretamente o valor do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) do local, utilizando como altura ( $h_{ref}$ ) e velocidade ( $v_{ref}$ ) de referencia a 25 metros e na velocidade ( $v$ ) e altura ( $h$ ) baseada na altura de 50 metros.

## 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 todos os dados observados para as alturas de 25 e 50 m são representadas nas Figuras 9.1 e 9.2.

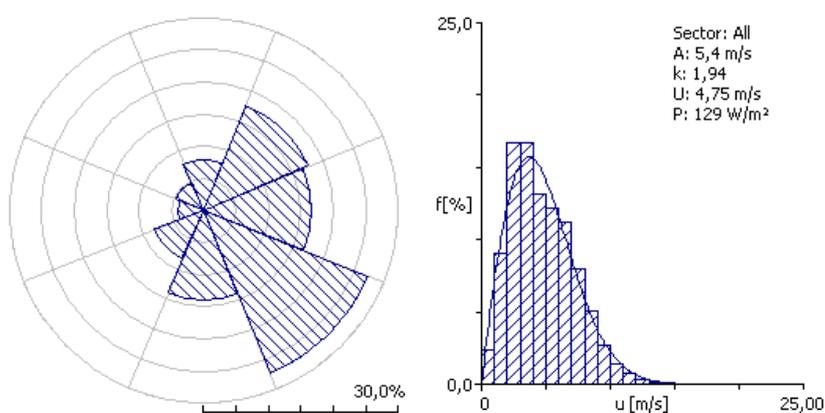


Figura 9.1. Distribuição estatística Anual dos ventos a 25m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCTI.

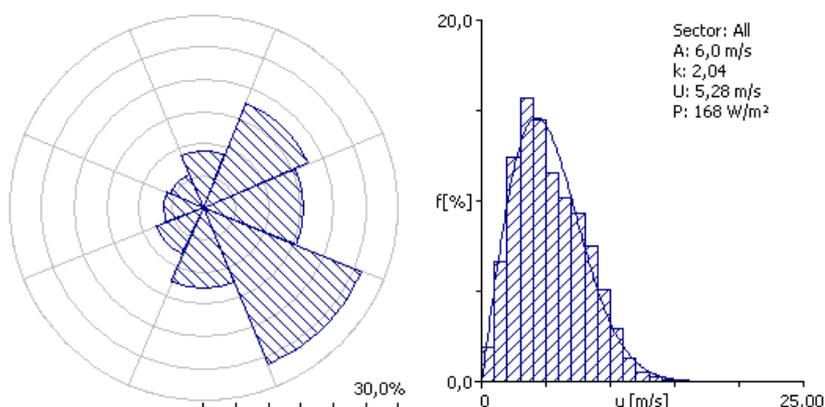


Figura 9.2. Distribuição estatística Anual dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCTI.

Observa-se que as direções sudeste (SE) e nordeste (NE) dos ventos são

predominantes para as duas alturas. Os valores médios da densidade de potência (P) e de velocidade dos ventos (U) 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	4,75	129,00	1,94	5,40
50 m	5,28	168,00	2,04	6,00

De modo geral os ventos foram predominantes na direção sudeste (SE) para os seis bimestres do ano tanto a 25 quanto a 50 metros. O perfil sazonal dos ventos nas suas direções predominantes é apresentado na Tabela 9.2. Desta forma, com a análise feita utilizando os dados do anemômetro de 25 metros, obtiveram-se os seguintes resultados: o terceiro e quarto bimestre apresentaram os maiores valores para a densidade de potência (P) para a distribuição estatística de Weibull, já o quarto e quinto bimestre apresentaram os maiores valores do fator de escala (A), e o primeiro e o quinto bimestre, os maiores valores do fator de forma (k). Analisando agora os dados do anemômetro de 50 metros, foram obtidos os seguintes resultados: o terceiro e o quarto bimestre apresentaram os maiores valores para a densidade de potência (P) para a distribuição estatística de Weibull e também os maiores fatores de escala (A), porém o terceiro e o quinto bimestre apresentaram os maiores valores para o fator de forma (k).

Deste modo, têm-se maiores informações a respeito dos padrões de vento predominantes na região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCTI.

Tabela 9.2. Análise estatística sazonal dos ventos em suas direções predominantes a 25 e 50 metros.

Altura	Bimestre do ano	Principal Direção	Frequência dos ventos (%)	P (W/m <sup>2</sup> )	K	A (m/s)
25 m	Primeiro	SE	35,00	121	<b>2,12</b>	5,40
	Segundo	SE	27,70	93	1,89	4,70
	Terceiro	NE	23,20	<b>230</b>	1,49	5,70
	Quarto	NE	24,20	<b>423</b>	1,37	<b>6,60</b>
	Quinto	SE	31,10	209	<b>2,33</b>	<b>6,70</b>



	Sexto	SE	33,70	142	1,89	5,50
50 m	Primeiro	SE	29,10	142	2,52	6,00
	Segundo	SE	27,30	118	2,04	5,30
	Terceiro	NE	22,30	<b>346</b>	<b>3,95</b>	<b>8,50</b>
	Quarto	NE	25,50	<b>407</b>	3,54	<b>8,90</b>
	Quinto	SE	30,50	227	<b>3,72</b>	7,30
	Sexto	SE	32,40	158	2,00	5,80

## 9.2. Cálculo do comprimento de rugosidade do local

Através da utilização da Equação 8.2, calculou-se o valor do comprimento de rugosidade do terreno na região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/INPE – MCTI, utilizando como referência 25 metros em relação a 50 metros. A média do comprimento de rugosidade ( $z_0$ ) calculado para o período de 2005 a 2011 analisado foi de 1,291 metros. Esse valor, segundo a Tabela 4.1 se enquadra para cidades grandes com prédios altos. Este valor é muito elevado para um terreno com vegetação baixa como o do Observatório Espacial do Sul. A causa de uma rugosidade elevada está sendo estudada com o intuito de verificar possíveis problemas de instalação, operação e manutenção dos equipamentos. Outro fator o que será investigado é a influência da estabilidade atmosférica na metodologia empregada.

## **CAPÍTULO 10**

### **CONCLUSÃO**

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

As três distribuições estatísticas estudadas apresentaram bom ajuste ao perfil dos ventos para o Observatório Espacial do Sul. No entanto a distribuição de Weibul e Rayleigh apresentaram a melhor correlação e os menores desvios. A maior densidade de potência (P) foi encontrada no quarto bimestre seguido do terceiro bimestre nas alturas de 25 e 50 metros, na análise de direção predominante.

Observa-se que em todos os bimestres do ano, a direção sudeste (SE) é predominante, porém para o terceiro e quarto bimestre existem altas frequências de ocorrência de ventos, de mesma proporção, também na direção nordeste (NE).

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

A partir do banco de dados de velocidade e direção dos ventos coletados pelos anemômetros instalados na estação SONDA – SMS, em operação no Observatório Espacial do Sul, em São Martinho da Serra, RS, foi obtido o perfil preliminar do potencial eólico da região central do Estado do Rio Grande do Sul.

Na continuidade do trabalho se dará ênfase na investigação da influência das condições de estabilidade atmosférica na determinação do perfil vertical de vento e na rugosidade do terreno a partir dos dados coletados na torre anemométrica. Outro ponto a ser aprofundado está relacionado à investigação da complementaridade entre as diversas fontes de energia: hidráulica, eólica e solar.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amarante, O.C., Brower, M., Zack, J., Sá, A.L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**, Brasília, 2001.
- Amêndola, César Augusto Moreira. **Contribuição ao estudo de aerogeradores de velocidade e passo variáveis com gerador duplamente alimentado e sistema de controle difuso**. São Carlos. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.
- Atlas de Energia Elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. Ed – Brasília : ANEEL, 2005. 243p : il.
- Atlas eólico: Rio Grande do Sul / elaborado por Odilon A. Camargo [et al.] e editado pela Secretaria de Energia Minas e Comunicações. Porto Alegre: SEMC, 2002. 70 p.: il., mapas.
- AWEA – American Wind Energy Association. **The Wind Energy Applications Guide**. Washington, 2001. Disponível em: [http:// www.awea.org](http://www.awea.org).
- AWEA – American Wind Energy Association. **Wind Power is Ready – Clean Energy Technology for Our Economy and Environment**. Washington, 2002. Disponível em: [http:// www.awea.org](http://www.awea.org).
- Campbellsci. Disponível em: <http://www.campbellsci.com>.
- Carvalho, P. **Geração Eólica**. Fortaleza, Imprensa Universitária, 146p. 2003.
- Castro, R. M. G. **Introdução À Energia Eólica, Energias Renováveis E Produção Descentralizada**. Universidade Técnica De Lisboa, 2008. Portugal.
- CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. **Energia Eólica – Princípios e Tecnologias**, 2008. Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_eolica.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.pdf).
- Eldridge, F.R. **Wind machines**. Van Nostrand, 1980.
- EREC, *European Renewable Energy Council*. **Renewable Energy Scenario to 2040**. 2004. pág.11.
- G.M. Joselin Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan and S. Rajapadian, **Renew. Sustain. Energ.** Rev. 11, 1117, 2007.
- Gasch, R. **Windkraftanlagen: Grundlagen und Entwurf**. B. G. Teubner, 1996.
- Gasch, R., Tewe, J. **Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and**



**Operation.** Solarpraxis AG, Alemanha, 2002.

- Global Wind Energy Council. **Global Wind Energy Outlook 2006.** Disponível em <<http://www.gwec.net/index.php?id=65>>.
- Grimm, A. M. **Notas de Aula de Meteorologia Básica.** Universidade Federal do Paraná, 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/index.html>>. Acessado em 15 de janeiro de 2010.
- Hansen, M.O.L. **Basic Rotor Aerodynamics applied to Wind Turbines.** Dept. of Energy Engineering Fluid Mechanics, Technical University of Denmark, 1998.
- IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*. **IPCC WG-I Fourth Assessment Report (AR4) – The Physical Basis on Climate Change – Summary for Policymakers.** Disponível em: <[http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/publications\\_and\\_data\\_reports.shtml](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml)>.
- Krohn, S. **Danish Wind Turbine Manufactures Association – Guided Tour on Wind Energy.** Copenhagen, 2001. Disponível em: <http://www.windpower.org>.
- Lutgens, Frederick K., Tarbuck, Edward J. **The Atmosphere: an introduction to Meteorology.** Sixth Edition. New Jersey, Prentice Hall, Inc., 462p. 1995.
- Manwell, J. F.; Mcgowan, J. G.; Rogers, A. L. **Wind energy explained.** New York: Wiley, 2002. 569 p.
- Marques, Jeferson. **Turbinas Eólicas: Modelo, Análise e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 132p. 2004.
- Martins, F. R., Guarnieri, R. A., Pereira, E. B., Mantelli, S., Chagas, R. C., Thomaz, C., Andrade, E. **Projeto SONDA - Rede Nacional de Estações para a coleta de dados meteorológicos aplicados ao setor de energia.** In: I Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2007, Fortaleza. Anais do I Congresso Brasileiro de Energia Solar. Fortaleza: Associação Brasileira de Energia Solar, 2007.
- Martins, F. R., Pereira, E. B. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. **Energy Policy**, Volume 39, July, 2011.
- Martins, F.R., Guarnieri, R.A., Pereira, E.B., 2007. **O aproveitamento da energia eólica (The wind energy resource).** Revista Brasileira de Ensino de Física, v.30, n.1, 1304, 2008.
- Pereira, E. B., Martins, F.R., Abreu S. L., Rütther, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, São José dos Campos, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente,



2006. Disponível em: <[sonda.ccst.inpe.br](http://sonda.ccst.inpe.br)>.

- Postagem especial: o ciclone extratropical do mês de agosto de 2005. Disponível em: <[http://www.paulotempo.blogspot.com/2008/05/postagem-especial-o-ciclone\\_31.html](http://www.paulotempo.blogspot.com/2008/05/postagem-especial-o-ciclone_31.html)>;
- R.B. Stull, *An introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1988.
- Rincondelvago. Disponível em: <<http://html.rincondelvago.com/pitot.html>>.
- Sansigolo, C. A. **Distribuições De Probabilidade De Velocidade E Potência Do Vento**, Revista Brasileira De Meteorologia, V.20, N.2, 207-214, 2005.
- SONDA, Sistema Nacional de Organização Nacional de Dados Ambientais. Estações do Projeto SONDA. Disponível em: <[sonda.ccst.inpe.br](http://sonda.ccst.inpe.br)>.
- Stevenson, W. J. **Estatística Aplicada à administração**. Harper & Row do Brasil, 1981.
- The European Wind Energy Association. **Wind Force 12. A Blueprint to achieve 12% of the world's electricity from wind power by 2012**. Edition 2004. 104 páginas. Disponível em: <[www.ewea.org](http://www.ewea.org)>.

Viterbo, Jean Carlo. **Geração de energia elétrica a partir da fonte eólica offshore**.

Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. São Paulo, 2008