

## POTENCIAL EÓLICO NO RIO GRANDE DO SUL – DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA DOS VENTOS NA REGIÃO CENTRAL DO ESTADO

### WIND ENERGY IN RIO GRANDE DO SUL – STATISTICAL DISTRIBUTION OF WIND VELOCITY IN THE CENTRAL AREA OF THE STATE

Alexandre Ceretta Dalla Favera

Eduardo Weide Luiz

Nelson Jorge Schuch

Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/CCR/INPE – MCT, Santa Maria – RS

alexandreceretta@lacs-sm.ufsm.br

Fernando Ramos Martins

Enio Bueno Pereira

Centro de Ciência do Sistema Terrestre – CCST/INPE – MCT, São José dos Campos – SP

fernando.martins@inpe.br

#### RESUMO

Este estudo procura identificar o melhor modelo estatístico para modelar a intermitência dos ventos e avalia o comportamento anual e sazonal do regime de ventos. Os dados anemométricos foram coletados na plataforma do Projeto SONDA em operação desde 2004 no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, região central do Rio Grande do Sul. A série de dados compreende o período de 2005 a 2011. A partir do estudo foi possível traçar um perfil do potencial eólico para a região central do estado. Avaliação comparativa das distribuições estatísticas de Rayleigh, Weibull e Log Normal foi realizada. As distribuições de Weibull e Rayleigh apresentaram os melhores ajustes e menores desvios para o perfil eólico da região. Os valores de velocidade média, densidade de potência e fator de escala da distribuição de Weibull apresentaram pequena variação sazonal que pode favorecer a implantação de plantas eólicas na região. De modo geral, os ventos apresentam maiores frequências na direção sudeste ao longo do ano, porém, no Outono e Inverno, a direção noroeste também mostrou alta frequência. Concluiu-se, também, que as maiores densidades de potência foram observadas na Primavera e no Inverno.

**Palavras-chave:** Energia eólica, distribuição estatística dos ventos, Projeto SONDA.

#### ABSTRACT

This study seeks to identify the best statistical model to describe the wind variability and evaluates the annual and seasonal behavior of the wind resource. The data were acquired from 2005 to 2011 at the SONDA measurement site located in São Martinho da Serra in the central region of Rio Grande do Sul, Brazil. A comparative study of the statistical distributions – Rayleigh, Weibull and Log Normal – was performed to determine which one better represents the wind pattern in the region. The Weibull and Rayleigh distributions showed lower deviations from ground data. The mean wind speed, the wind power density and the scale factor of Weibull distribution showed little seasonal variation. This feature indicates an interesting pattern for deployment of wind farms in the region. In general, the Southeasterly winds are dominant along the whole year, but the Northwesterly winds also showed high frequency during the Autumn and Winter seasons. The study also demonstrated that the highest wind power density occurs during Spring and Winter.

**Keywords:** Wind energy, Statistical distributions, SONDA Project.

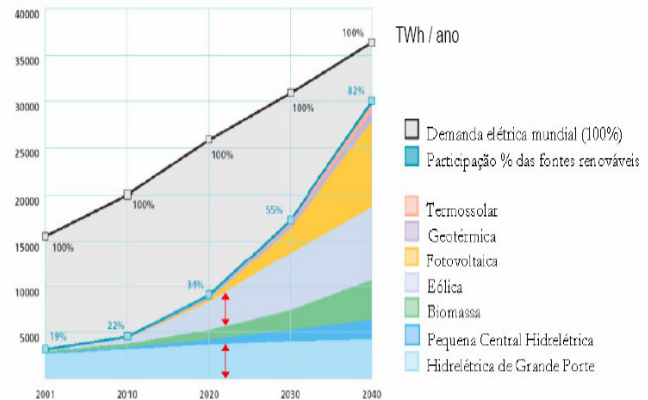
## 1. INTRODUÇÃO

Ventos se caracterizam por serem uma fonte de energia limpa, renovável. 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 de potência mínima da ordem de  $500 \text{ W/m}^2$ , 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 (WMO), em apenas 13% da superfície terrestre o vento apresenta velocidade média igual ou superior a esta marca. 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 a indústria e academia ligada ao setor de energia eólica. Esta organização estabeleceu como meta a geração de 12% da eletricidade consumida no mundo a partir de fonte eólica em 2020 (GWEC, 2006).

O Conselho Europeu de Energia Renovável (EREC), que congrega inúmeras associações de energia renovável na Europa, também traçou meta para adoção de fontes renováveis. A EREC aponta em seu estudo 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 similar ao demonstrado pela geração nuclear e hidráulica nas últimas 4 décadas. A Figura 1 traz o cenário publicado pela EREC (EREC, 2004).

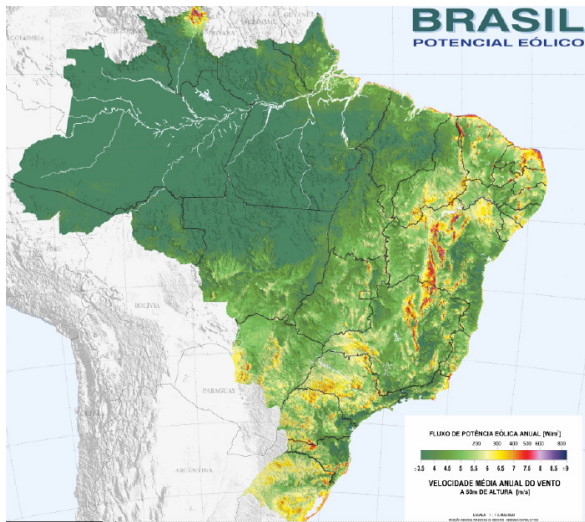


**Figura 1** - Cenário para o crescimento das fontes renováveis na matriz elétrica mundial. Fonte: EREC, 2004.

O Brasil tem histórico ligado ao uso de fontes de 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 (Amarante et al., 2001; Pereira et al., 2008, Martins e Pereira 2011). A maioria dos estudos mais recentes indicam um potencial eólico com valores superiores a 60.000 MW (energia eólica). A Figura 2 apresenta um mapa da velocidade média dos ventos a altura de 50 metros no Território Brasileiro.

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 em estados do Nordeste Brasileiro. 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 et al., 2007).



**Figura 2** - Velocidade média do vento a altura de 50 metros no Território Brasileiro. Fonte: Amarante et al., 2001.

## 2. PANORAMA 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. Possivelmente, as máquinas eólicas movidas por forças de sustentação foram introduzidas na Europa pelas Cruzadas, por volta do século XI (Eldridge, 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 apresenta um moinho de vento típico da Holanda.



**Figura 3** - Moinho de vento típico da Holanda. Fonte: CRESESB, 2008.

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

A geração de eletricidade a partir do vento teve início na década de 1930 nos Estados Unidos, onde cataventos multipás eram conectados a pequenos geradores de corrente contínua utilizados para carregar baterias de modo a favorecer o acesso à energia elétrica em áreas rurais. Em meados da década de 1940, teve início o aproveitamento eólico-elétrico em grande escala (AWEA, 2001).

A geração de eletricidade com o uso de turbinas eólicas de grande porte, para alimentar de forma suplementar o sistema elétrico, é tecnologia que existe há diversas décadas. Desde a fase experimental, ressaltam-se os primeiros aproveitamentos eólio-elétricos realizados durante as décadas de 1940 e 1950 nos Estados Unidos e na Dinamarca. 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).

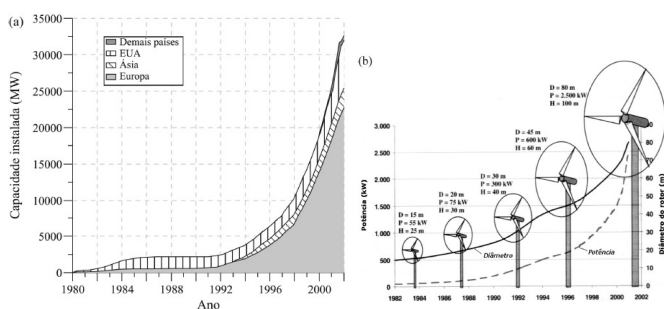
Na década de 1970 e até meados da década de 1980, após a primeira grande crise do petróleo, diversos países, inclusive o Brasil, despenderam esforços em pesquisa sobre a utilização da energia eólica para a geração de eletricidade. Entretanto, foi a partir de experiências de estímulo ao mercado, realizadas na Califórnia (década de 1980), Dinamarca e Alemanha (anos 90), que o aproveitamento eólico-elétrico atingiu a escala de contribuição mais significativa, em termos de geração e economicidade (Amarante et al., 2001). Dinamarca é atualmente o país que apresenta a maior contribuição de energia

eólica em sua matriz energética e é o maior fabricante mundial de turbinas eólicas (WWEA, 2011).

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 4. A capacidade instalada total mundial de aerogeradores voltados à geração de energia elétrica atingiu 74223 MW ao final de 2006, apresentando um crescimento de mais de 20% em relação ao ano anterior.

O Brasil totalizou a inserção de 921 MW de capacidade instalada ao fim de 2010 (Martins e Pereira, 2011). Quase todos os parques eólicos em operação no território brasileiro estão localizados nas regiões Sul e Nordeste do país em razão do elevado potencial indicado para ambas as regiões nos estudos realizados até a atualidade.

Na última década, regulamentações e programas de incentivos à fontes renováveis como o PROINFA (2002) foram implantados pelos diversos níveis de governo no Brasil (Martins e Pereira, 2011). Apesar da iniciativa tímida em relação aos incentivos políticos e econômicos desenvolvidos no país, a geração eólica já atingiu um patamar de mercado competitivo com as fontes de energia convencionais. Tal fato pode ser confirmado pelo resultado do último leilão de energia realizado em 2011 quando boa parte da energia comercializada teve como fonte a energia eólica com preços inferiores a pequenas centrais hidroelétricas ou termoeletricas. O governo brasileiro vem desenvolvendo de forma ainda (Martins et al., 2007).



**Figura 4** - (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: Gasch e Twele, 2002.

### 3. 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.

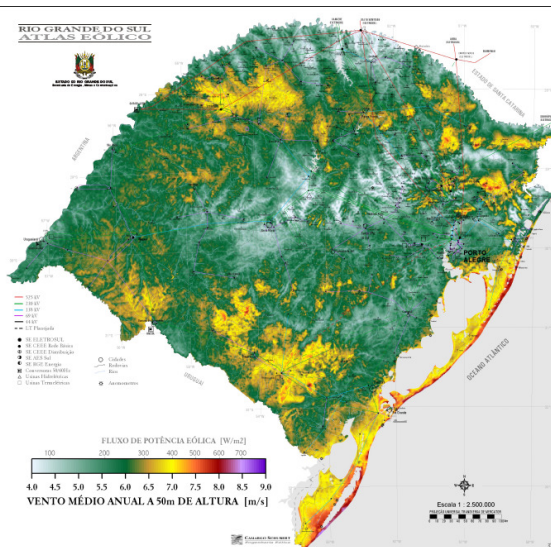
O anticiclone subtropical Atlântico é um centro de alta pressão (AP) cuja posição média anual é próxima a [30°S, 25°O]. Em razão da presença desse centro, a circulação atmosférica resulta no predomínio de ventos de leste-nordeste sobre toda a área do Brasil situada abaixo da latitude 10°S.

Outro fenômeno meteorológico importante no que se refere à circulação atmosférica no Rio Grande do Sul é a depressão barométrica do nordeste da Argentina. Trata-se de uma área quase permanente de baixas pressões, geralmente estacionária a leste dos Andes, cuja posição anual média é de aproximadamente [29°S e 66°O]. Essa depressão é causada pelo bloqueio da circulação imposto pela parede montanhosa dos Andes e acentuada pelo intenso aquecimento das planícies de baixa altitude da região.

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

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

A Figura 5 apresenta o resultado do mapeamento da velocidade média anual dos ventos a 50 metros de altura no estado do Rio Grande do Sul.



**Figura 5** - Vento médio anual a 50 metros de altura no Rio Grande do Sul. Fonte: marante et al., 2002.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Aquisição de dados na estação SONDA

A Rede SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais voltados ao setor energético) é coordenada e executada pelo Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) em conjunto com Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC). Sua implementação foi realizada com suporte financeiro da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), e sua manutenção e operação vem recebendo o apoio da PETROBRAS.

O objetivo da Rede SONDA é a aquisição de dados meteorológicos e climáticos destinados a atender a demanda de informações do setor energético sobre os recursos de energia solar e eólica no território brasileiro. A Rede SONDA vem possibilitando o estudo e desenvolvimento de modelos numéricos para estimativas dos potenciais de energia solar e eólica por meio de uma infra-estrutura física e de recursos humanos destinada à coleta e qualificação de dados meteorológicos, eólicos e solarimétricos medidos em estações de superfície (Martins et al., 2007).

Os dados coletados nas estações SONDA passam por um processo de qualificação com o objetivo de identificar dados suspeitos (errôneos), reforçar a confiabilidade e servir de alerta para a manutenção dos equipamentos em operação na estação. O processo de qualificação dos dados

meteorológicos e eólicos adota os critérios estabelecidos pela Meteorological Resource Center e publicados na WebMET.com. Em resumo, a instalação dos equipamentos, a organização e o controle de qualidade dos dados coletados seguem padronização estabelecida internacionalmente de modo a garantir a confiabilidade das informações e dados disponibilizados para acesso público e estudos científicos. Os dados coletados nas estações SONDA estão disponíveis para acesso público apenas no site <<http://sonda.ccst.inpe.br/>>.

Três anemômetros da “R. M. Young Company”, instalados nas alturas de 10, 25 e 50 metros da torre anemométrica instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT, em São Martinho da Serra, RS, são responsáveis por registrar os dados de velocidade e direção horizontais dos ventos (Figura 6). O anemômetro está instalado sobre uma haste vertical que o mantém afastado 1,5 metros em relação à torre eólica, como mostrado na Figura 7. 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. A direção do vento é determinada por um potenciômetro, que gera uma voltagem analógica diretamente proporcional ao ângulo azimutal como sinal de saída.

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. Este equipamento tem como finalidade garantir que o sinal possa ser transmitido por distâncias de até 100 m com confiabilidade.



**Figura 6** - Anemômetro R. M. Young modelo 05106. Fonte: Campbell, 2009.



**Figura 7** - Equipamento de medida de dados eólicos da estação SONDA – SMS, instalada no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE – MCT.

A base de dados utilizados neste estudo compreende o período de Janeiro de 2005 a Dezembro de 2010, abrangendo 309.716 dados coletados pelo anemômetro instalado nas alturas de 25 e 50 metros na estação SONDA - SMS.

#### 4.2. Distribuição estatística dos ventos

Uma das primeiras etapas de qualquer projeto para geração de energia elétrica requer a avaliação do potencial energético disponível. Por exemplo, em uma hidrelétrica, esse potencial é obtido através da quantidade de água que será armazenada no reservatório. Nos sistemas eólicos, o potencial é calculado através da distribuição estatística de uma série histórica de dados de velocidade dos ventos.

Essa informação é essencial para o correto dimensionamento do projeto de um parque eólico e, principalmente, para o estudo de sua viabilidade econômica.

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.

A principal barreira é a disponibilidade de dados observados que atendam a demanda de informações com a resolução temporal e a confiabilidade necessária para o desenvolvimento desses estudos. A disponibilidade de dados para locais específicos é escassa. O custo de implantação de uma estação de superfície para aquisição de dados de vento é elevado. Além disso, é necessário a coleta de dados por um período de alguns anos para permitir uma avaliação da variabilidade interanual e conhecer a climatologia dos ventos na região. Uma série de dados curta temporalmente pode representar uma condição meteorológica não representativa do clima na região em função de fenômenos sazonais ou de periodicidade não ainda completamente conhecida. Quanto maior o período de tempo de coleta de dados, 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 mínimo de dois anos.

Além disso, poucos dados de campo são coletados com o propósito de avaliar o aproveitamento da energia eólica e muitas estações de medida estão localizadas de forma inadequada em relação à obstáculos e em alturas relativas ao solo que não correspondem a altura de instalação de aerogeradores. A maioria das séries históricas de dados observados estão localizados próximos à áreas urbanas sujeitas a alteração do uso de solo, surgimento de obstáculos decorrentes do processo de urbanização. Metadados com informações sobre

calibração, manutenção e substituição dos equipamentos de medida também devem ser conhecidas. Quando esses metadados não estão disponíveis, é de extrema importância realizar uma qualificação dos dados coletados antes de empregá-los em estimativas de potenciais eólicos.

A Figura 8 ilustra um exemplo de histograma construído com dados de ventos coletados por anemômetros na costa do Ceará a 50 metros de altitude. No histograma ou diagrama de frequências, os valores medidos de velocidade do vento são agrupados em intervalos de valores, denominados classes.



**Figura 8** - Exemplo de distribuição estatística para dados de ventos. Fonte: Carvalho, 2003.

De posse da curva de potência do gerador eólico (que fornece a potência gerada para cada velocidade do vento) e da distribuição estatística da velocidade do vento no local da instalação (histograma da Figura 6), a geração total de energia elétrica pode ser estimada através da equação (Gasch, 1996):

$$E_{\text{Total}} = \sum f_i P_i T \quad (1)$$

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

$$f_i = \frac{t_i}{T} \quad (2)$$

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

É importante salientar que problemas decorrentes da aquisição de dados de campo e obtenção do histograma de frequência da velocidade do vento, além de influenciarem negativamente na avaliação da produção de energia elétrica, irão 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, 1996).

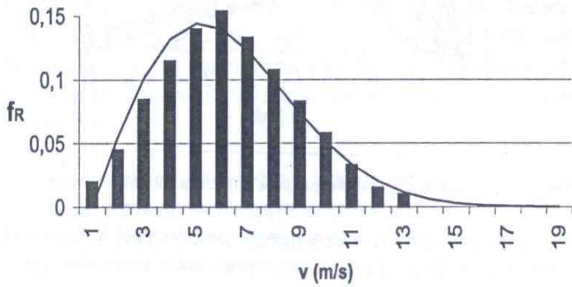
Uma das funções de distribuição utilizadas para descrever o histograma de frequências é a denominada distribuição de Rayleigh definida pela seguinte equação:

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{v_{\text{med}}^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{v_{\text{med}}}\right)^2} \quad (3)$$

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

$$v_{\text{med}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (4)$$

Uma das vantagens dessa distribuição é a necessidade de apenas um parâmetro para a definição da função de distribuição, possibilitando o uso em locais que tenham disponíveis apenas valores médios de velocidade do vento. 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 a velocidade dos ventos, pois esta se adapta bem ao regime de ventos europeu, continente onde se localiza a maior parte dos fabricantes. A Figura 9 mostra um histograma de frequência aproximado por uma distribuição de Rayleigh.



**Figura 9** - 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, 2003). A distribuição de Weibull é calculada através de:

$$f_W(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (5)$$

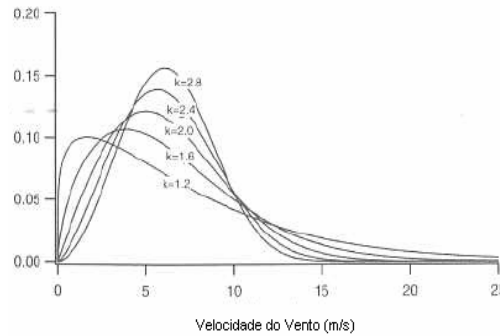
onde  $k$  representa o fator de forma e  $A$  é o fator de escala. Estes dois parâmetros definem a distribuição estatística e estão relacionados, respectivamente, à forma da curva e à velocidade média do vento.

As diversas formas que a distribuição de Weibull pode assumir para diferentes valores do fator de forma são mostradas na Figura 10. Para o caso específico de  $k = 2$ , tem-se a distribuição de Rayleigh. O fator de forma é inversamente proporcional às oscilações da velocidade do vento e, dessa forma, está relacionado com a intensidade de turbulência definida por:

$$S = \frac{\sigma}{v_{med}} \quad (6)$$

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

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v - v_{med})^2 dt} \quad (7)$$



**Figura 10** - Distribuição de Weibull para diferentes fatores de forma. Fonte: Manwell, et al., 2002.

Desta forma, quanto menor a oscilação da velocidade, menor é o desvio padrão, maior é o fator de forma e mais “estrito” 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.

A função de densidade de probabilidade Log Normal, também utilizada neste estudo, é descrita pela Equação 8:

$$f_{LG}(v) = \frac{1}{v\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln v - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (8)$$

onde  $f_{LG}(v)$  é a frequência de ocorrência de cada velocidade horizontal  $v$  do vento;  $\mu$  é o parâmetro de posição e  $\sigma$  é o parâmetro de escala. Os parâmetros  $\mu$  e  $\sigma$  são, respectivamente, média e o desvio padrão dos logaritmos naturais de  $v$ . Obtidos a partir do cálculo das equações 9 e 10 respectivamente:



$$\mu = \ln v_{med} - \frac{1}{2} \ln \left( 1 + \frac{VAR(v)}{v_{med}^2} \right) \quad (9)$$

$$\sigma^2 = \ln \left( 1 + \frac{VAR(v)}{v_{med}^2} \right) \quad (10)$$

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

Com intuito de verificar a adaptação das distribuições estatísticas propostas com as medidas coletadas em campo foi realizada a etapa de validação através do cálculo dos desvios estatísticos MBE (Mean Bias Error) e RMSE (Root Mean Square Error). Outro método de avaliação utilizado foi a

correlação entre os dados medidos e os estimados pelas distribuições de Rayleigh, Weibull e Log Normal. O desvio MBE, calculado pela Equação (8.4), indica o desvio médio dos valores estimados pelos modelos em relação aos valores medidos, enquanto que o RMSE, obtido através da Equação (8.5), representa uma medida da dispersão dos valores estimados em torno dos valores medidos.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n}{n} \quad (11)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (12)$$

onde  $y_i$  representa os valores estimados pelas distribuições,  $x_i$  são os valores observados pelo anemômetro operando a 50 metros do solo na estação SONDA e  $N$  representa o número de pares de dados utilizados na avaliação.

### 4.3. Estudo do comportamento anual e sazonal do regime de ventos

Os dados coletados pelos anemômetros, em cada altura da torre, foram agrupados ano a ano e também todos os anos juntos para a realização de uma análise anual e sazonal do perfil eólico da região. Agruparam-se as medidas de cada anemômetro em períodos trimestrais, de acordo com as quatro estações do ano (Verão, Outono, Inverno e Primavera), a fim de se avaliar o comportamento sazonal do vento também no que diz respeito às direções predominantes. Nesta etapa do estudo foi feito uso do aplicativo computacional WASP® (Wind Atlas Analysis and Application Program), desenvolvido pelo Risø DTU National Laboratory for Sustainable Energy. Foram obtidas o histograma ajustado as funções de distribuição de frequências de Weibull e a rosa dos ventos para os diferentes grupos analisados. Posteriormente, 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 sazonais.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Estudo comparativo entre as distribuições estatísticas para o perfil dos ventos na estação SONDA – SMS

A partir do total de dados de velocidade do vento foram calculados os parâmetros de forma ( $k$ ) e de escala ( $A$ ) para a distribuição de Weibull; posição ( $\mu$ ) e escala ( $\sigma$ ) para a distribuição Log Normal; assim como outros parâmetros estatísticos como a velocidade média ( $v_{med}$ ) de 5,31 m/s e desvio padrão dos dados de 2,68 m/s. Nas equações 13, 14 e 15 estão as respectivas equações de Rayleigh, Weibull e Log Normal com seus referentes parâmetros.

$$f_R(v) = \frac{\pi}{2} \frac{v}{5,31^2} e^{-\left(\frac{\pi}{4}\right)\left(\frac{v}{5,31^2}\right)^2} \quad (13)$$

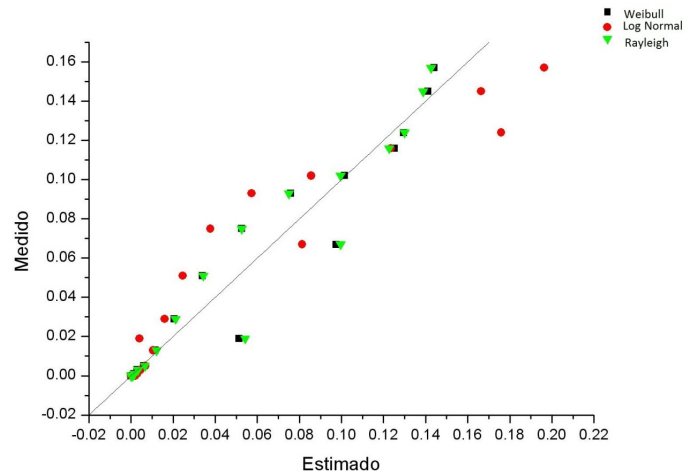
$$f_W(v) = \frac{2,04}{6} \left(\frac{v}{6}\right)^{2,04-1} e^{-\left(\frac{v}{6}\right)^{2,04}} \quad (14)$$

$$f_{LG}(v) = \frac{1}{0,48v\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln v - 1,56)^2}{2 \cdot 0,48^2}} \quad (15)$$

Com as frequências calculadas pelas distribuições estatísticas representadas nas equações encontradas para Rayleigh, Weibull e Log Normal realizou-se a etapa de validação por meio do cálculo dos desvios estatísticos MBE e RMSE entre valores de frequência observados e calculados. Os desvios obtidos estão apresentados na Tabela 1. Observa-se que tanto a distribuição de Weibull quanto a de Rayleigh apresentaram boas correlações, cerca de 95%, e desvios MBE da ordem de -0,4%. Os desvios quadráticos RMSE apresentaram-se da ordem de 30%. A distribuição Log Normal apresentou boa correlação, porém apresentou maior desvio RMSE. A mesma conclusão pode ser verificada e evidenciada pela Figura 11 que mostra um gráfico de dispersão entre os valores observados e calculados de frequência dos ventos. As distribuições de Weibull e Rayleigh estão mais próximas da função  $y=x$ , o que indica a menor dispersão e maior correlação com os dados observados na estação SONDA - SMS.

**Tabela 1** - Fator de correlação e desvios apresentados pelas funções distribuições de frequências

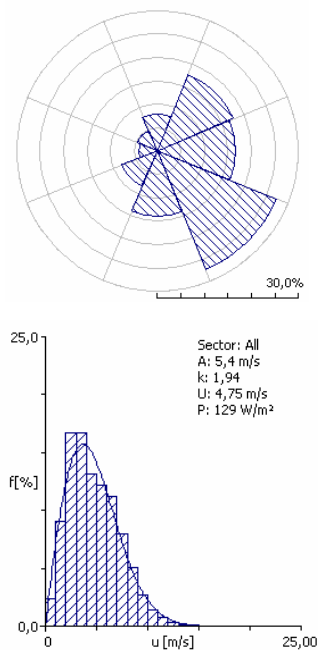
	Rayleigh	Weibull	Log Normal		
R	0,972	R	0,974	R	0,955
R <sup>2</sup>	0,944	R <sup>2</sup>	0,949	R <sup>2</sup>	0,912
MBE %	-0,465	MBE %	-0,407	MBE%	-0,040
RMS E%	30,814	RMSE %	29,317	RMSE%	47,460



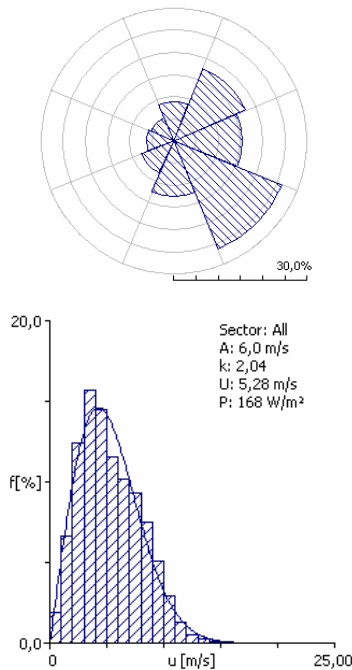
**Figura 11** - Gráfico de dispersão entre os dados observados na estação SONDA-SMS e os valores estimados pelas funções das distribuições de Weibull, Log Normal e Rayleigh.

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

As distribuições estatísticas da velocidade dos ventos, representada pela Rosa dos Ventos, juntamente com o histograma ajustado pela distribuição de Weibull para todos os dados observados para as alturas de 25 e 50 m são representadas nas Figuras 12 e 13, respectivamente.



**Figura 12** - Distribuição estatística Anual dos ventos observados a 25m de altura na estação SONDA-SMS localizada no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra.



**Figura 13** - Distribuição estatística Anual dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

Observa-se que as direções sudeste (SE) e nordeste (NE) dos ventos são predominantes para as duas alturas. Os valores médios da velocidade dos ventos ( $U$ ) e de densidade de potência ( $P$ ) determinados para as diferentes alturas são apresentados na Tabela 2 juntamente com os valores do fator de forma  $k$  e o fator de escala  $A$  calculados pela função de Weibull. Esses resultados correspondem à análise de toda a série temporal entre 2005 e 2011.

A análise estatística sazonal dos ventos, referente a cada uma das quatro estações de cada ano agrupadas para as duas alturas tem os seus principais resultados apresentados na Tabela 3. Observa-se, que tanto a 25 m quanto a 50 m, o fator de escala ( $A$ ) e as velocidades médias ( $U$ ) apresentam as valores semelhantes na Primavera, Verão e Inverno. Os valores para o Outono apresentaram-se menores que nas demais estações do ano. Quando analisado a densidade de potência ( $P$ ) observam-se as maiores previsões para o Inverno e a Primavera, e os maiores fatores de forma ( $k$ ) para Primavera e Verão.

A Figura 14 mostra a Rosa dos Ventos indicando as direções observadas em cada uma das

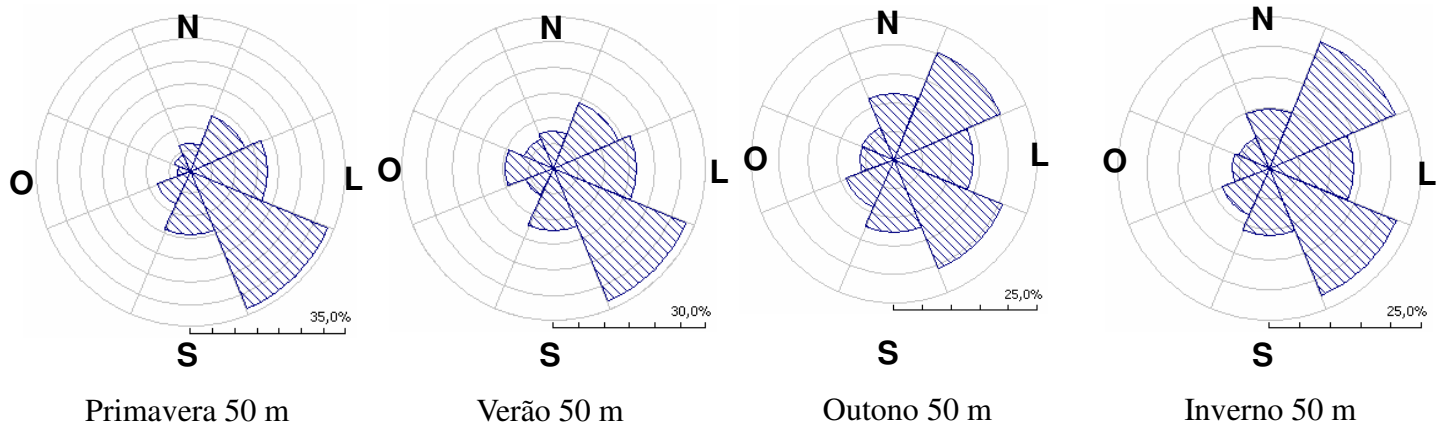
estações do ano para a altura de 50 metros. Observa-se que a direção sudeste (SE) é claramente predominante na Primavera e Verão, porém, o mesmo não ocorre quando analisado o Outono e o Inverno. Nestes há duas direções predominantes com frequências muito próximas, nordeste (NE) e sudeste (SE). Resultados similares foram obtidos na análise sazonal dos dados coletados na altura de 25 m acima do solo. O perfil sazonal dos ventos nas suas direções predominantes é apresentado na Tabela 4. Desta forma, têm-se maiores informações a respeito dos padrões de vento predominantes na região do Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

**Tabela 2** - Parâmetros da análise estatística dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

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

**Tabela 3** - Parâmetros da análise estatística sazonal dos ventos medidos no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT.

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



**Figura 14** - Distribuição estatística Sazonal dos ventos a 50m de altura medida no Observatório Espacial do Sul – OES/CRS/CCR/INPE - MCT

**Tabela 4** - Análise estatística sazonal dos ventos em suas direções predominantes a 25 e 50 metros acima do solo

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

## 6. CONCLUSÕES

Este estudo procurou identificar o melhor modelo estatístico para modelar a variabilidade dos ventos na região central do Rio Grande do Sul. O estudo também avalia o comportamento anual e sazonal do regime de ventos nessa região. Os dados anemométricos foram coletados na plataforma do Projeto SONDA em operação desde 2004 no Observatório Espacial do Sul em São Martinho da Serra, região central do Rio Grande do Sul. A série de dados utilizada no estudo compreende o período de Janeiro/2005 a Dezembro/2010.

As três distribuições estatísticas – Weibull, Rayleigh e Log-normal – apresentaram bom ajuste ao perfil dos ventos observados no Observatório Espacial do Sul. No entanto, a distribuição de Weibull e Rayleigh apresentaram a melhor correlação e os menores desvios. Observa-se que os fatores de forma

(*k*) da distribuição de Weibull se aproximaram de 2 neste estudo. Quando o fator de forma se iguala a 2, a distribuição de Weibull e a distribuição de Rayleigh são equivalentes.

Os valores de velocidade média (*U*) e fator de escala (*A*) da distribuição estatística de Weibull foram próximos para o Inverno, a Primavera e o Verão. A maior densidade de potência (*P*) foi encontrada na Primavera, seguido do Verão, tanto na análise com todas as direções, como também na análise de direção predominante.

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

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. Deve-se ter em mente que uma série de dados de superfície com duração de 5 anos não é suficiente para estabelecer a climatologia dos ventos na região, mas permite uma análise das características do perfil de ventos ao longo do ano e um bom conhecimento da sua variabilidade interanual.

Como continuidade deste trabalho, serão investigados métodos para o estabelecimento de um ano eólico típico para a região de forma similar ao que é utilizado para a energia solar. O ano típico propicia a definição de valores de ventos característicos para cada mês do ano, permitindo assim a simulação de geração eólica característica em uma localidade específica e estudos de viabilidade econômica para uma planta geradora.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa PIBIC/INPE-CNPq, à PETROBRÁS e à FINEP pelo suporte financeiro e a todas as pessoas envolvidas tanto na instalação, operação e manutenção das estações de superfície, bem como da base de dados gerada na Rede SONDA. Agradecimento especial à equipe do Laboratório de Instrumentação Meteorológica (LIM/INPE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais que presta todo o suporte de manutenção das estações da rede SONDA.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

Amarante, O. A. C., Silva, F. J. L., Custódio, R.S., 2002. Atlas do Potencial Eólico: Rio Grande do Sul. Brasil.

Amêndola, C. A. M., 2007. 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.

AWEA, 2002. Wind Power is Ready – Clean Energy Technology for Our Economy and Environment. Washington: American Wind Energy Association..

AWEA, 2001. The Wind Energy Applications Guide. Washington: American Wind Energy Association.

Campbell, 2009. Manual de Operação – Anemômetro 05106. [online]: [www.campbellsci.com](http://www.campbellsci.com).

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

Castro, R. M. G., 2008. Introdução à Energia Eólica, Energias Renováveis e Produção Descentralizada. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa. Portugal.

CRESESB, 2008. Energia Eólica – Princípios e Tecnologias. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. [online]: [www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial\\_eolica.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/tutorial_eolica.pdf).

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

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

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

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

GWEC, 2006. Global Wind Energy Council. Global Wind Energy Outlook 2006. [online]: [www.gwec.net/index.php?id=65](http://www.gwec.net/index.php?id=65).

Manwell, J. F.; McGowan, J. G.; Rogers, A. L., 2002. Wind energy explained. New York: Wiley. 569 p.

Martins, F. R., Pereira, E. B. 2011. Enhancing information for solar and wind energy technology deployment in Brazil. Energy Policy, 39, 7, 4378-4390.

Martins, F. R., Guarnieri, R. A., Pereira, E. B., 2008. O aproveitamento da energia eólica. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.30, n.1, 1304.

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.

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., Ruther, R., Amarante, O., Chan, C. S., Lima, E., 2008. Solar and Wind Energy Resource Assessment in Brazil. SWERA Report. Brazilian Institute for Space Research, São José dos Campos, Brazil.

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



Viterbo, J. C., 2008. 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.

WWEA, 2011. World Wind Energy Report 2010. Report. World Wind Energy Association. [online]: [www.windea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010\\_s.pdf](http://www.windea.org/home/images/stories/pdfs/worldwindenergyreport2010_s.pdf).