

ISSN 0104-1347

## Estimativa do potencial eólico a partir de tabelas de probabilidades da velocidade média pentadal do vento, na Cascata, em Pelotas - RS<sup>1</sup>

Estimate of eolic potential by probabilities tables of wind average speed pentad, on Cascata, at Pelotas - RS, Brazil.

João Baptista da Silva<sup>2</sup> e Luís Eduardo Torma Burgueño<sup>3</sup>

**Resumo** - O trabalho visou estimar o potencial eólico dos ventos a partir de tabelas de probabilidades das velocidades médias pentadais, construídas desde os registros das velocidades médias diárias, tomados a 7 metros do solo, coletados na Estação Agroclimatológica do Centro de Pesquisas Agropecuárias de Clima Temperado, CPACT (EMBRAPA), situado na Cascata a 224 metros do nível médio dos mares. As tabelas da velocidade média pentadal foram construídas para os níveis de 1% a 99%. Obtiveram-se estimativas iniciais do potencial eólico para os níveis de probabilidade de 25, 50 e 75% e, posteriormente, foram estendidas para as alturas de 10, 30 e 50 metros do solo e para diversas dimensões de rotores dos geradores. Embora os baixos valores obtidos do potencial eólico, reconhece-se que a criteriosa localização dos equipamentos de captação do vento podem tornar viável o aproveitamento desta fonte de energia na região.

**Palavras-chave:** vento, probabilidades, potencial eólico.

**Abstract** - The present work aim to estimate the eolic potential by probabilities tables of average wind speed pentad, built from records of average daily wind speed, taken 7 meters from the soil, in the "Centro de Pesquisas Agropecuarias de Clima Temperado" (CPACT/EMBRAPA), situated on Cascata at 224 meters above the middle level of sea. Table of probabilities of average wind speed pentad was built to the levels from 1% to 99%. Begin estimates of eolic potential was obtained to the levels of probabilities of 25, 50 and 75%, and, after spreads to the heights of 10, 30 and 50 meters from soil and to differents dimensions of eolic motor's rotor. However the small values of eolic potential obtained, believe that the criterious equipments location of wind captation can make feasible the use of this energetic resources on region.

**Key words:** wind, probabilities, eolic potential.

### Introdução

Os grandes impactos ambientais provenientes do uso e implantação de fontes energéticas tradicionais (hidrelétrica, biomassa, nuclear...), têm levado muitos países a investirem cada vez mais no desenvolvimento de tecnologias para o uso de fontes renováveis de energia. A opção por um modelo, descentralizado e ecologicamente viável, de geração de

energia, possibilitará suprir as necessidades de grande parte da população, principalmente nas zonas rurais e comunidades isoladas que, sem energia, permanecem condenadas ao subdesenvolvimento, conduzindo um enorme contingente de pessoas que, em busca de melhores condições econômicas, sociais e culturais, tendem a migrar para os centros urbanos mais desenvolvidos.

<sup>1</sup>Trabalho realizado com financiamento do CNPq e da FAPERGS.

<sup>2</sup>Engenheiro Agrônomo, Livre Docente, Doutor em Ciências, Bolsista do CNPq, Prof. Titular (aposentado) do Instituto de Física e Matemática (UFPel). 96001-307 Pelotas, RS. jbsilva@ufpel.tche.br

<sup>3</sup>Estudante de Engenharia Agrícola (UFPel), Bolsista de Iniciação Científica da FAPERGS.

O efeito migratório destas populações está fundamentalmente ligado ao fato de serem afetadas por um elevado índice de pobreza que, de maneira geral, deve-se ao uso da energia estar associado a um dos parâmetros básicos de sua subsistência: a alimentação. O aporte energético dessas áreas, portanto, deve ser considerado como prioritário no processo de desenvolvimento, possibilitando a melhoria das condições de vida, aumentando a produtividade do trabalho e, conseqüentemente, fixando significativas parcelas da população em seus locais de origem, posto que, de alguma forma, nas várias etapas da produção de alimentos diversos tipos de energia serem largamente utilizados: na preparação do solo, sementeira, irrigação, adubação, colheita, transporte, processamento e conservação, além de proporcionar serviços essenciais como água potável, iluminação e conservação de alimentos.

Sob estes aspectos, a força dos ventos é uma abundante e inesgotável fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. Apesar de ser uma fonte relativamente barata, a energia eólica apresenta algumas características que dificultam seu uso como fonte de energia, além de sua ocorrência ser irregular para pequenos períodos, a quantidade de energia diária disponível, pode variar em muitas vezes de uma estação do ano para outra, em um mesmo local. Para um determinado local, com boas condições de velocidade do vento, dever-se-á também levar em conta sua direção predominante, os períodos de calmaria e a influencia do terreno circundante, e sobretudo as rajadas por seus possíveis efeitos danosos (BAPTISTA DA SILVA et al., 1997a, 1997b).

Pode-se considerar os seguintes fatores gerais a respeito das características do vento:

- Os locais mais adequados, com ventos fortes e constantes, encontram-se ao longo de todo o litoral, diminuindo a potência do vento conforme aumenta a distância para o interior;
- As zonas montanhosas são também favoráveis, já que a velocidade do vento aumenta com a altura.

Apesar de vários trabalhos e pesquisas científicas realizadas nas décadas de 70 e 80, a geração de energia a partir de turbinas eólicas no Brasil teve início apenas em julho de 1992, com a instalação de uma turbina de 75kW na ilha de Fernando de Noronha (ADEODATO & OLIVEIRA, 1996). Hoje, a capaci-

dade instalada no Brasil é de 20,3 MW, com instalações eólicas de grande porte nos Estados do Ceará, Pernambuco, Minas Gerais e Paraná, e se trabalha com o objetivo de instalar 1.000MW de energia eólica no País até 2005, meta estabelecida durante "Encontro do Fórum Permanente de Energias Renováveis", realizado em Brasília em 1994.

O governo do Estado do Rio Grande do Sul, após a realização do 1º Seminário sobre Energia Eólica do Estado do RS, realizado em Porto Alegre, em outubro de 1999, tomou a iniciativa de avaliar o potencial eólico do litoral gaúcho e interior do Estado, para tanto, foram instalados diversas torres com equipamentos para medição da velocidade, duração, regularidade e direção dos ventos.

Em Pelotas, com os dados da estação agroclimatológica localizada no Campus da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), foi avaliado o potencial local a partir de tabelas de probabilidades construídas, verificando-se um promissor uso desta fonte de energia (BAPTISTA DA SILVA et al., 2000).

A localidade da Cascata, situada a cerca de 30km do centro da cidade de Pelotas, caracteriza-se pela predominância de pequenas propriedades rurais, locais onde o turismo rural tem-se mostrado economicamente viável. Embora a região seja servida, em parte, pela rede de distribuição de energia elétrica, a energia eólica juntamente com a energia solar representam uma alternativa tanto para o uso doméstico e agrícola como uma forma de atração para o turismo rural ecológico, vindo a diversificar a matriz energética na região.

O objetivo do presente trabalho é, a partir da construção de tabelas de probabilidades da velocidade média pentadal, obter uma estimativa preliminar do potencial eólico dos ventos incidentes nas cercanias da antiga sede do CPACT/EMBRAPA, na Cascata, Pelotas, RS.

## Material e métodos

Os dados<sup>4</sup> utilizados, foram extraídos das observações diárias da Estação Agroclimatológica da Cascata, Pelotas, Estado do Rio Grande do Sul, situada na BR 392, Km 78, latitude 31°52'S, longitude 52°21'W a uma altitude de 224m do nível médio do mar, obtidos através de um anemógrafo universal tipo

<sup>4</sup>Média aritmética da velocidade do vento, medida em três horários: às 9h, 15h e 21 h.

Dines Mecânico modelo ANG-1N.1-093, instalado a 7 metros do solo, para o período de 30 anos, 1954 a 1984 (exceto 1957, pelo grande número de falhas). Naqueles anos em que o número de falhas foi pequeno (não superior a 10) optou-se por estimar um valor que levou em conta a média do mês e do ano correspondente. As observações posteriores a 1985 foram registradas em um aparelho Totalizador Cata-vento Weld instalado a dois metros do solo. Esta mudança na base de coleta das informações (novo equipamento e método) inviabilizou a utilização destes dados.

Construíram-se tabelas de probabilidades na base de pântadas<sup>5</sup>, para todas as 73 pântadas do ano, para o período de 30 anos, de 1954 a 1984. Como se sabe, as tabelas construídas não significam previsão do futuro, mas representam um tipo de previsão climatológica para determinados períodos de um ano médio, mas não para cada ano em particular.

Para estimar-se o potencial eólico da região, primeiramente procedeu-se a construção das tabelas de probabilidades, cuja fundamentação teórica baseia-se na homogeneidade de variâncias e na aproximação dos dados à distribuição normal. A homogeneidade das variâncias foi testada através do teste de Cochran (DIXON & MASSEY Jr., 1969), cuja expressão matemática é:

$$C = \frac{\text{Maior } S_i^2}{\sum S_i^2} \quad (1)$$

onde:  $C$  é valor da estatística do teste de Cochran e  $S_i$  a variância dos dados pentadais,  $i = 1, 2, \dots, 73$ .

No que diz respeito a aproximação dos dados à distribuição normal, estes foram testados através dos testes de Fisher e de Shapiro & Wilk. O teste de Fisher, aplicado a cada uma das pântadas, fundamenta-se nas medidas de assimetria e curtose,  $g_1$  e  $g_2$ , respectivamente (FISHER, 1941). A significância dos desvios de normalidade foram testados pelo teste  $Z$  bilateral, ao nível de probabilidade de 5%. O teste  $W$  de normalidade de Shapiro & Wilk ( $W=b^2/S^2$ ), baseia-se em ordenar as observações ( $X_i$ ) e calcular:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} - \frac{(\sum X_i)^2}{n^2} \quad (2)$$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (X_{n-i+1} - X_i) \quad (3)$$

sendo  $k = n/2$ , se  $n$  for par ou  $k = (n-1)/2$ , se  $n$  for ímpar;  $a_{n-i+1}$  é obtido da tabela de constantes (Tabela A-1 de SHAPIRO, 1990).

Para construir-se as tabelas de probabilidade, foi utilizada a distribuição de  $t$  para os níveis de probabilidade de 1% a 99%. Para cada pântada, calculou-se a média  $\bar{Z}$  e o desvio padrão  $S_z$  dos valores transformados ( $Z=A.X^{1-b}$ ), no caso em que foi necessário a transformação de dados; caso contrário, estas medidas representam a média e o desvio padrão dos dados originais. Os valores de  $Z_p$ , correspondentes aos diversos níveis de probabilidade foram calculados pela expressão:

$$Z_p = \bar{Z} + t_{p, n-1} S_z \quad (4)$$

onde  $t_{p, n-1}$  é obtido da tabela de  $t$  unilateral para  $p = 1\%$  a  $99\%$ , com  $n-1$  graus de liberdade.

Para retornar-se aos dados originais foi utilizada a transformação inversa:

$$X_p = \exp \left[ \frac{\ln \left( \frac{Z_p}{A} \right)}{1-b} \right] \quad (5)$$

onde:  $X_p$  é a velocidade média do vento estimada para o nível de probabilidade  $p$  na pântada e  $A$  e  $b$  são os parâmetros utilizados na transformação dos dados.

Construídas as tabelas procedeu-se a determinação do potencial eólico do vento, utilizando as estimativas da velocidade média pentadal para os níveis de probabilidade de 25%, 50% e 75%, disponíveis nas tabelas. Para tal, usou-se a fórmula de Betz (MACINTYRE, 1983), que permitiu uma avaliação da potência máxima teórica do vento:

$$P_{\max} = \left( \frac{16}{27} \right) \left( \frac{\rho}{2} \right) S.V^3 \quad (6)$$

onde:  $\rho$  é a massa específica da unidade de volume de ar;  $S$  a área do rotor;  $V$  é a velocidade média do vento.

<sup>5</sup>Pântada é um conjunto de cinco dias consecutivos. A primeira pântada do ano compreende o período de 1 a 5 de janeiro, a segunda de 6 a 10 de janeiro, ..., até a última de 26 a 31 de dezembro. A última pântada de fevereiro representa os cinco dias de 25 de fevereiro a 1º de março nos anos comuns e cinco dias médios do mesmo período nos anos bissextos (5/6 do total dos seis dias).

A partir da fórmula apresentada por Betz, para uma área circular  $S=1m^2$  varrida pelas pás no seu movimento de rotação, obtém-se para a potência máxima teoricamente recuperável a seguinte expressão:

$$P_{\max} = 0,0001935.V^3 \quad (7)$$

sendo  $V$ , expresso em  $m.s^{-1}$  e  $P$  em kW.

As estimativas iniciais obtidas a 7 metros do solo são convertidas para alturas de 10, 30 e 50 metros, com o objetivo de estimar as possíveis potências, visto que estas alturas são as usuais na captação do vento para geração de energia eólica. Para tanto utilizou-se a Lei da Potência para descrição da velocidade do vento apresentada em TUBELIS & NASCIMENTO (1980).

$$\left( \frac{v_2}{v_1} \right) = \left( \frac{a_2}{a_1} \right)^{1/7} \quad (8)$$

onde:  $v_i$  é a velocidade do vento na altura  $i$ ;  $a_i$  a altura da medição,  $i = 1, 2$ .

## Resultados e discussão

O teste de Cochran resultou, para os dados originais, em  $C=0,1248$ , significativo a 1% ( $C_{0,01;73;29}=0,0345$ ), indicando uma heterogeneidade das variâncias.

Os valores transformados ( $Z=10.X^{0,375}$ ), submetidos ao mesmo teste, apresentaram um valor de  $C=0,0299$ , não significativo a 5% de probabilidade ( $C_{0,05;73;29}=0,0316$ ).

Os desvios da normalidade pelo teste de Fisher foram significativos em 52 pântadas (71%) nos dados originais e, nos transformados, apenas 12 pântadas (16%) não apresentaram normalidade.

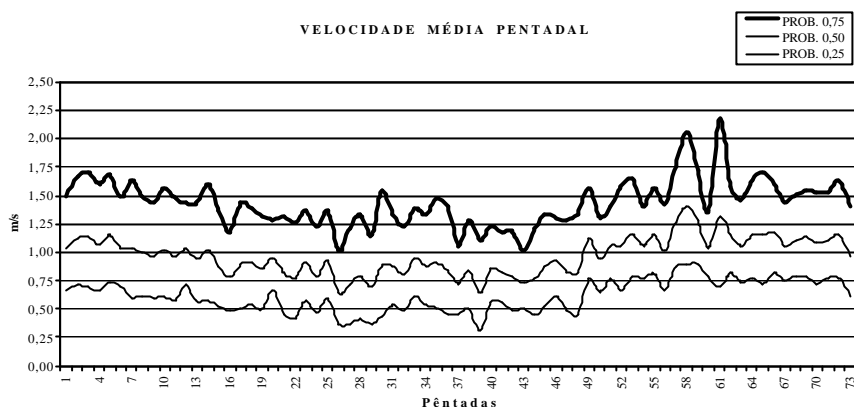
O teste  $W$  de Shapiro & Wilk, para o caso de amostras de tamanho  $n=30$  e ao nível de significância de  $\alpha = 0,05$ , apresenta um valor de  $W = 0,927$  (SHAPIRO, 1990). Desta forma a hipótese de nulidade, ou seja, de que os dados podem ser estudados pela distribuição normal, é rejeitada quando a estatística  $W$  é igual ou menor que 0,927 (teste unilateral à esquerda). Por este teste, encontraram-se 49 pântadas (67%) que não seguiam a distribuição normal, nos

dados originais e, nos dados transformados, apenas 9 pântadas (12%), não adquiriram esta propriedade.

Os valores estimados da velocidade média pentadal do vento obtidas a partir de 30 anos (1954 - 1984), para os níveis de probabilidade de 25%, 50% e 75% encontram-se na Figura 1. Pode-se notar que as maiores velocidades médias situam-se entre as pântadas 53 e 73 e entre as pântadas 1 e 14, primavera e verão, respectivamente. De modo geral, espera-se que, em 50% dos anos, as velocidades médias pentadais estejam compreendidas entre  $0,64 m.s^{-1}$  (pântada 26 e 39) e  $1,40 m.s^{-1}$  (pântada 58). Os potenciais correspondentes a estes valores são  $5,07.10^{-5} kW/m^2$  e  $5,31.10^{-4} kW/m^2$ . As estimativas do potencial eólico a 7m do solo e sua distribuição ao longo do ano encontram-se na Figura 2. A Tabela 1 apresenta os potenciais eólicos (kW) estimados para rotores com área de 5 a  $200 m^2$ , para as alturas de 10, 30 e 50 m do solo, para a velocidade média anual de  $1,09 m.s^{-1}$ , registrada a 7m do solo.

As tabelas construídas não foram testadas, tendo em vista que o conjunto de observações de 1986 a 2000 foram obtidos em um novo aparelho e com método totalmente distinto do anterior. Como a lei da potência não é válida nesta situação, em que houve mudança no processo de medição, não se pode utilizar este último conjunto de dados para testar as tabelas, como a princípio pretendia-se. Embora não tendo sido testadas as tabelas, o método empregado na sua construção é o mesmo utilizado em outros trabalhos já publicados, onde os testes puderam ser realizados (AMARAL et al., 1975, BAPTISTA DA SILVA, 1979, BAPTISTA DA SILVA & LARROZA, 1999), o que nos inclina a aceitá-las como adequadas. No momento em que a série, iniciada em 1986, atingir uma determinada magnitude de observações (30 anos, no mínimo), deve-se voltar a construir novas tabelas para o local.

Embora fosse esperado, pela maior altitude (MARTINS, 1993), uma velocidade média anual superior àquela ocorrida no Campus da UFPel ( $3,12 m.s^{-1}$ ), o vento apresentou a velocidade média anual de  $1,09 m.s^{-1}$ . O fato de ter-se valores muito pequenos para as velocidades médias pentadais estimadas e, conseqüentemente, baixos potenciais eólicos, deve-se às condições orográficas e à topografia ambiental onde está situada a Estação Agroclimatológica da Cascata. A estação localiza-se em uma área envolta por morros e cercada de densa vegetação, o que diminui significativamente a velocidade do vento (NEL-



**Figura 1:** Estimativa da velocidade média do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ), a 7 metros acima do solo, para os níveis de 25, 50 e 75%, nas 73 pântadas do ano no CPACT/EMBRAPA, Cascata, em Pelotas, RS.

SON et al., 1993). Além da rugosidade do terreno, a posição onde está localizada a sede confere-lhe uma forte componente ascensional em detrimento da componente horizontal que é a que efetivamente contribui para a geração de energia. Entretanto, isto não significa que os ventos incidentes em toda região da Cascata sejam insuficientes para geração de energia elétrica, mas sim evidenciam a localização inadequada do aparelho para este tipo de expectativa e reforça o conhecimento da ação pontual dos ventos. Por outro lado, a intensidade da velocidade do vento para o local é suficientemente grande para o uso do vento no bombeamento d'água para fins agrícolas. Para ve-

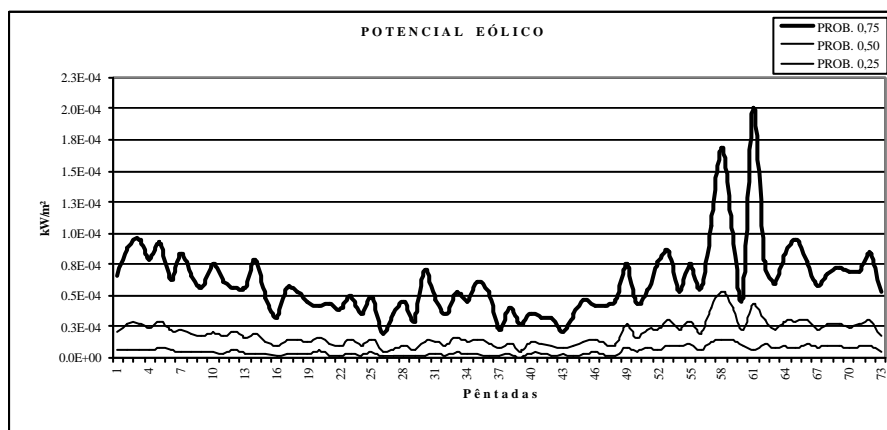
## Conclusões

Os potenciais eólicos estimados para os níveis de probabilidade de 25, 50 e 75%, das tabelas da velocidade média pentadal, apresentam-se como razoáveis para diversas atividades agrícolas e turísticas na região. Estimaram-se, também, potenciais eólicos médios para rotores de diversas dimensões, nas alturas de captação de 10, 30 e 50 metros acima do solo.

As condições orográficas e a topografia ambiental da Estação Agroclimatológica da Cascata prejudicaram uma correta avaliação do potencial eólico da região. Mesmo assim, a velocidade do vento é suficiente para o uso agrícola da água.

As informações geradas constituem valioso subsídio na confecção de um mapa eólico regional.

A adequada localização de instrumentos de captação do vento permitirão avaliar com exatidão as reais condições deste elemento meteorológico como fonte de energia eólica, visto que a altitude do local (224 metros), confere-lhe condições de ventos suficientemente apropriados.



**Figura 2:** Estimativa do potencial eólico do vento ( $\text{kW.m}^{-2}$ ), a 7 metros acima do solo, para os níveis de 25, 50 e 75%, nas 73 pântadas do ano no CPACT/EMBRAPA, Cascata, em Pelotas, RS.

locidades de  $1,4 \text{ m.s}^{-1}$  certos modelos de cataventos podem obter vazões aproximadas de  $2000 \text{ l.h}^{-1}$  (CATAVENTOS KENYA, 2000). Sendo a Cascata uma região tipicamente de agricultura familiar, com nítida vocação para o turismo rural, com algumas experiências de sucesso, o estímulo à adoção dessas tecnologias consubstanciarão, não só o uso mais racional dos recursos naturais existentes e uma alternativa viável às práticas de irrigação e uso doméstico da água, como também uma atração do ponto de vista do turismo rural ecológico.

**Tabela 1.** Potenciais eólicos (kW) estimados para diversas áreas de rotores à diferentes alturas solo, considerando-se a velocidade média anual de 1,09 m.s<sup>-1</sup> registrada a 7 metros acima do solo.

Área do rotor (m <sup>2</sup> )	Altura do solo (m)		
	10	30	50
5	1,46E-03	2,34E-03	2,91E-03
10	2,92E-03	4,68E-03	5,82E-03
15	4,38E-03	7,01E-03	8,73E-03
20	5,84E-03	9,35E-03	1,16E-02
30	8,76E-03	1,40E-02	1,75E-02
40	1,17E-02	1,87E-02	2,33E-02
50	1,46E-02	2,34E-02	2,91E-02
100	2,92E-02	4,68E-02	5,82E-02
150	4,38E-02	7,01E-02	8,73E-02
200	5,84E-02	9,35E-02	1,16E-01

#### Referências bibliográficas

- ADEODATO, S., OLIVEIRA, W.D. A riqueza dos melhores ventos, **Globo Ciência**, São Paulo, v. 6, n. 63, p. 20-25, 1996.
- AMARAL, E., BAPTISTA DA SILVA, J., BASSOLS, M. C. **Tabelas de probabilidades de temperatura mínima em Pelotas, RS (média das mínimas e mínima absoluta)**. Brasília : Departamento Nacional de Meteorologia, 1975. 61 p. (Boletim Técnico, n.º 9).
- BAPTISTA DA SILVA, J. **Tabelas de probabilidades das precipitações pluviométricas máximas pentadais em Pelotas, RS**. Pelotas: UFPel, 1979. 144 p. Tese (Professor Titular). Concurso Público para Professor Titular em Estatística Experimental e Computação Eletrônica, Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, 1979.
- BAPTISTA DA SILVA, J., ZANUSSO, J.T., SILVEIRA, D.L.M. et al. Estudo da velocidade e direção dos ventos em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 227-235, 1997a.
- BAPTISTA DA SILVA, J., SCHONS, R.L., LARROZA, E.G. Probabilidades de ocorrência de rajadas máximas de vento em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 237-240, 1997b.
- BAPTISTA DA SILVA, J., LARROZA, E.G. Probabilidades de ocorrência de diferentes velocidades dos ventos em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 91-99, 1999.
- BAPTISTA DA SILVA, J., LARROZA, E.G., BURGUEÑO, L.E.T. Estimativa do potencial eólico no Campus da Universidade Federal de Pelotas, em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 111-119, 2000.
- CATAVENTOS KENYA. **Bombeamento d'água: uso de catavento**. Disponível em: [www.agridata.mg.gov.br/catavent.htm](http://www.agridata.mg.gov.br/catavent.htm) (janeiro/2001).
- DIXON, W.J., MASSEY Jr., F.J. **Introducion to statistical analysis**. Tokio : McGraw-Hill Kogakusha Ltda. 1969. 639 p.
- FISHER, R.A. **Statistical methods for research workers**. 8. ed. London : Oliver and Boyd, 1941, 35 p.
- MACINTYRE, A. J. **Máquinas motrizes hidráulicas**, Rio de Janeiro : Editora Guanabara Dois, 1983. 649 p.
- MARTINS, D. **Determinação do potencial eólico na região de Botucatu, SP**. Botucatu, SP : Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, 1993. 12 p.
- NELSON, V., GILMORE, E. H., STARCHER, K. **Introduction to wind energy**. 4. ed., Canyon : Alternative Energy Institute/ West Texas A & M University, 1993, 40 p.
- SHAPIRO, S.S. **How to test normality and other distributional assumptions**. 2. ed., Wisconsin : American Society for Quality Control, 1990. 92 p. (v.3).
- TUBELIS, A., NASCIMENTO, F.J.L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo : Nobel, 1980, 374 p.