

VOLUME 2, NÚMERO 11 NOVEMBRO DE 2019

ESTIMATIVA DO POTENCIAL EÓLICO DE TORRES, RS, USANDO PROBABILIDADES PENTADAIS

João Baptista da Silva¹, Jorge Andrioni²

¹Eng.Agr.. Livre Docente, Doutor em Ciências, Professor Titular (aposentado), do Instituto de Física e Matemática da UFPel, Bolsista do CNPq.

²Aluno de Graduação da Faculdade de Meteorologia – UFPe, bolsista da FAPERGS.

¹jbs39@terra.com.br

RESUMO

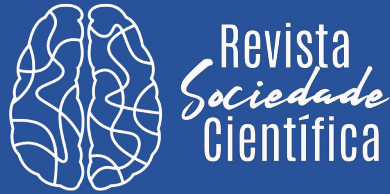
No presente trabalho, avaliou-se o potencial eólico da localidade de Torres, no Estado do Rio Grande do Sul. As Velocidades médias pentadais do vento foram estimadas pela aproximação da distribuição normal, para as probabilidades de 1% a 99% e, daí, determinou-se o potencial eólico esperado pela fórmula de Betz. As estimativas iniciais dos potenciais eólicos, nas alturas de 7, 10, 30, 50, 100 e 140 metros, para os níveis de probabilidades de 25, 50 e 75% da velocidade média pentadal apresentaram-se como adequadas para diversas atividades agrícolas e turísticas na localidade em estudo. Constitui estas informações um subsídio valioso para estudos mais aprofundados quanto à possibilidade de instalação de usina geradora de energia elétrica nas vizinhanças do local de origem dos dados observados.

PALAVRAS-CHAVE: distribuição normal, ventos, lei da potência.

ESTIMATE OF THE EOLIC POTENTIAL OF TORRES, RS, USING PENTADS PROBABILITIES

ABSTRACT

This paper presents the results of an estimate of the eolic potential of Torres, of the state of Rio Grande do Sul, Brazil, The average pentad speed of wind were estimated by



approximation to the normal distribution for the probabilities of 1% to 99%. The expected eolic potential was determined by the Betz's formula. The initial estimates of the eolic potential in the 7, 10, 30, 50, 100 e 140 meters of high, for the probability level of 25%, 50%, e 75% of the pentad overage speed revealed adequate for the various agricultural and the tourist activities in the location in the study. This is valuable information for electric generating plants projects in the neighborhood of the location that originated the observed data.

KEYWORDS: normal distribution, wind, power's law.

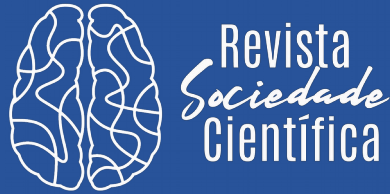
1 INTRODUÇÃO

Os grandes impactos ambientais provenientes de fontes energéticas tradicionais (termoelétrica, biomassa, nuclear, etc) tem levado muitos países a investirem cada vez mais no desenvolvimento de novas tecnologias para o aproveitamento das fontes renováveis de energia. Sob estes aspectos, a força dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável limpa e disponível em quase todos os lugares.

No Brasil, a geração de energia a partir de turbinas eólicas, iniciou-se em julho de 1992, contando hoje com uma capacidade de mais de 20MW, com turbinas de médio e grande porte conectadas à rede elétrica. Além disso, existem dezenas de turbinas de pequeno porte funcionando em locais isolados da rede convencional para aplicações diversas, como bombeamento d'água, carregamento de baterias, telecomunicações e eletrificação rural.

As diferentes metodologias de avaliação do potencial eólico, por exemplo, aquelas baseadas nas tabelas de probabilidades da velocidade média do vento, sob a hipótese de normalidade dos dados ([2], [1]) e, as características pontuais do vento, justificam o presente trabalho.

O objetivo do presente trabalho é obter estimativas preliminares do potencial eólico da localidade de Torres no Rio Grande do Sul, usando metodologia distinta daquela da elaboração do mapa eólico do Estado.



2 MATERIAL E MÉTODOS

A velocidade do vento é medida com anemômetro ou com cata-vento tipo Wild, ambos localizados a 7 metros do solo. Os dados são geralmente registrados em três observações diárias, 12 TMG, 18 TMG e 24 TMG, sendo que em outros locais as observações são registradas em médias diárias (km/dia). Os arquivos de dados da velocidade média diária, criados para um período de 10 anos (1991 a 2000), possibilitaram gerar os arquivos da velocidade média pentadal, que foram usados na construção das tabelas de probabilidade dessa variável climática, nas três localidades (São Luiz Gonzaga, Torres e Uruguaiana).

A fundamentação teórica deste trabalho 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 [4], aplicável quando uma das variâncias é muito discrepante em relação às restantes [5]. No teste de Cochran, compara-se a pênstada de maior variância com a soma das variâncias de todas as pênstadas, no nível de significância de 5%.

Para a aproximação dos dados à distribuição normal, foram usados os testes de Fisher e de Shapiro & Wilk ([6], [8]). O teste de Fisher, aplicado para cada uma das pênstadas, fundamenta-se nas medidas de assimetria e curtose. A significância dos desvios de normalidade foi testada pelo teste t bilateral (pequenas amostras), ao nível de significância de 5%. Quando estas propriedades não se verificam, pode-se buscar uma transformação adequada dos dados. Detalhes sobre os testes de normalidade e de homogeneidade de variâncias (fórmulas, hipóteses, etc), encontram-se em [2].

Na construção das tabelas de probabilidades, foi utilizada a distribuição de t, para os níveis de probabilidade de 1% a 99%, atendida a pressuposição da normalidade dos dados. Para cada pênstada, calculou-se a média Z e o desvio padrão s_z dos valores transformados, quando necessária a transformação de dados. As probabilidades foram estimadas pela expressão: $Z_p = Z + t_{p,(n-1)}s_z$, onde: Z e s_z são a média e o desvio padrão dos dados transformados (ou originais) de cada pênstada e $t_{p,(n-1)}$ é obtido da tabela de t

unilateral para p no intervalo de 1% a 99% com $n-1$ graus de liberdade. No caso dos dados terem sido transformados na construção das tabelas, volta-se aos dados originais pela transformação inversa correspondente.

Construídas as tabelas, procedeu-se à determinação do potencial eólico do vento, utilizando as estimativas da velocidade média pentadal para os níveis de probabilidade de 25%, 50% e 75%. Para tal usa-se a fórmula de Betz [7] que permite uma avaliação do potencial 16 máximo teórico do vento ($P_{m\acute{a}x}$, em kW):

$$P_{M\acute{a}x.} = \left(\frac{16}{27}\right) \left(\frac{\rho}{2}\right) Av^3 \quad (1)$$

Sendo:

ρ - massa específica da unidade de volume de ar

A - área do rotor (m)

v - velocidade média do vento (m/s).

A partir da fórmula de Betz, para uma área circular $A= 1\text{m}$ movimento de rotação, obtém-se para a potência máxima teoricamente recuperável a seguinte expressão: $P = 0,0001935 v^3$, expresso em m/s e P em kW. As estimativas iniciais da velocidade do vento, obtidas para as alturas de 7 metros do solo, foram convertidas para as alturas de 10, 30, 50, 100 e 140 metros, visto serem estas as alturas usuais de captação do vento para geração de energia elétrica. Para tal, usa-se a lei da potência [9]:

$$\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = \sqrt[7]{\left(\frac{a_2}{a_1}\right)}, \quad (2)$$

Onde:

v - velocidade do vento na altura ^a

a - altura de medição.

Foram estimados também os potenciais eólicos para rotores com áreas variáveis de 5 a 200m, nas alturas de 10, 30, 50, 100 e 140 metros do solo, em função da velocidade média diária, estimada a partir dos 10 anos de observação, na localidade em

apreço. As tabelas de probabilidades não puderam ser testadas, em virtude da indisponibilidade de novos conjuntos de dados para verificação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em Torres os desvios da normalidade pelo teste de Fisher ($\alpha=0,05$) foram significativos apenas em cinco (7%) pênadas dos dados originais. Para a mesma localidade, o teste de Shapiro & Wilk, para o caso de amostras de tamanho $n=10$ e ao nível de probabilidade de $\alpha = 0,05$, apresenta um valor de $W = 0,842$. Dessa forma, a hipótese de nulidade de que os dados podem ser estudados pela distribuição normal é rejeitada quando a estatística W é igual ou menor do que $0,842$, visto ser um teste unilateral à esquerda. Por este teste se encontrou apenas três pênadas (cerca de 4%) que não seguiam a normalidade.

Quanto a homogeneidade de variâncias, o teste de Cochran ($C_{0,05;73;9}=0,04678$) apresentou o seguinte resultado em Torres, $C=0,04258$, valor não significativo a 5%, indicando a existência de variâncias homogêneas.

Uma amostra das probabilidades da velocidade média pentadal do vento, para a localidade de Torres, obtidas a partir de dados coletados a 7 metros do solo, para os níveis de probabilidade de 25%, 50% e 75% são apresentadas na Figura 1.

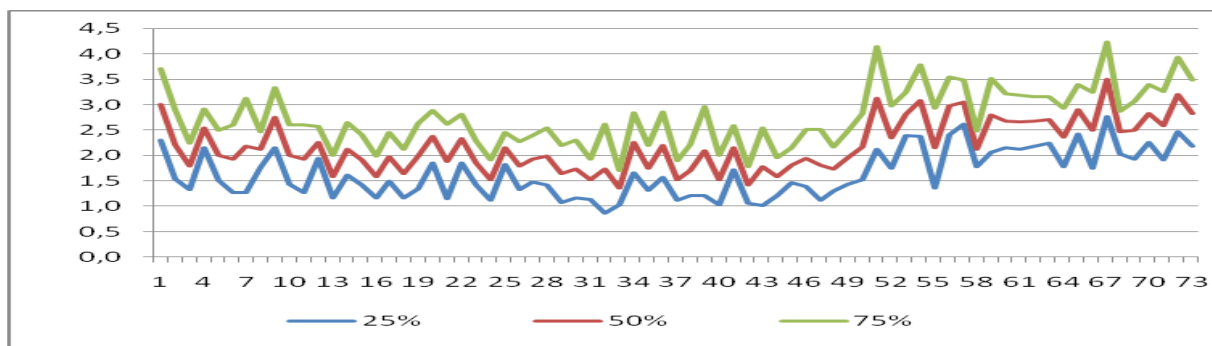


FIGURA 1 – Probabilidades das velocidades médias do vento calculadas para os níveis de 25, 50 e 75%, para as 73 pênadas do ano a 7 metros do solo, em Torres, RS.

Os potenciais eólicos do vento (kW) foram estimados para rotores de 1m², nas alturas de 7, 10, 30, 50, 100 e 140 metros do solo, aos níveis de probabilidade de 25%, 50% e 75%, nas 73 pêntadas do ano.

Uma amostra dos resultados, para Torres, encontra-se na Tabela 1, de acordo com as indicações da avaliação do vento como energia eólica, obtidos pela fórmula apresentada por MACINTYRE [7]. Por outro lado, acredita-se que, sendo o objetivo deste trabalho à obtenção de estimativas preliminares do potencial eólico da localidade em apreço, o estudo reveste-se de plena validade. O ideal seria obterem-se estimativas a partir de séries adequadas de registros, tomados experimentalmente nas alturas de 10, 30, 50, 100 e 140 metros. Todavia estas séries não estão disponíveis e, se fossem iniciadas agora estas captações de dados teríamos que esperar alguns anos para iniciar este trabalho.

TABELA 1 – Potenciais eólicos estimados para Torres, RS, nas 35 pêntadas do ano, para os níveis de probabilidade 25, 50 e 75%, nas alturas de 7, 10, 30 e 50m, com área de rotor de 1m²

| PÊNTADAS | 7m | | | 10m | | | 30m | | | 50m | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 25% | 50% | 75% | 25% | 50% | 75% | 25% | 50% | 75% | 25% | 50% | 75% |
| 1 | 0,002 | 0,005 | 0,010 | 0,003 | 0,006 | 0,012 | 0,004 | 0,010 | 0,018 | 0,006 | 0,012 | 0,023 |
| 2 | 0,001 | 0,002 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,006 | 0,001 | 0,004 | 0,009 | 0,002 | 0,005 | 0,011 |
| 3 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,005 |
| 4 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,002 | 0,004 | 0,006 | 0,004 | 0,006 | 0,009 | 0,004 | 0,007 | 0,011 |
| 5 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,006 | 0,002 | 0,004 | 0,007 |
| 6 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,003 | 0,008 |
| 7 | 0,000 | 0,002 | 0,006 | 0,000 | 0,002 | 0,007 | 0,001 | 0,004 | 0,011 | 0,001 | 0,005 | 0,014 |
| 8 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,005 | 0,002 | 0,004 | 0,007 |
| 9 | 0,002 | 0,004 | 0,007 | 0,002 | 0,005 | 0,008 | 0,004 | 0,008 | 0,013 | 0,005 | 0,009 | 0,017 |
| 10 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,004 | 0,008 |
| 11 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,003 | 0,008 |
| 12 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,003 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,003 | 0,005 | 0,008 |
| 13 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 |
| 14 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,002 | 0,003 | 0,007 | 0,002 | 0,004 | 0,008 |
| 15 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,006 |
| 16 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 |
| 17 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,007 |
| 18 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 |
| 19 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,007 | 0,001 | 0,004 | 0,008 |
| 20 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,002 | 0,005 | 0,009 | 0,003 | 0,006 | 0,011 |
| 21 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,006 | 0,001 | 0,003 | 0,008 |
| 22 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,002 | 0,005 | 0,008 | 0,003 | 0,006 | 0,010 |
| 23 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,005 |
| 24 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 |
| 25 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,002 | 0,004 | 0,005 | 0,003 | 0,004 | 0,007 |
| 26 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,005 |
| 27 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,001 | 0,003 | 0,006 |
| 28 | 0,001 | 0,002 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,006 | 0,001 | 0,004 | 0,007 |
| 29 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,005 |
| 30 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,005 |
| 31 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,003 |
| 32 | 0,000 | 0,001 | 0,003 | 0,000 | 0,001 | 0,004 | 0,000 | 0,002 | 0,006 | 0,000 | 0,002 | 0,008 |
| 33 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,000 | 0,001 | 0,002 |
| 34 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,002 | 0,004 | 0,008 | 0,002 | 0,005 | 0,010 |
| 35 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,004 | 0,001 | 0,002 | 0,005 |

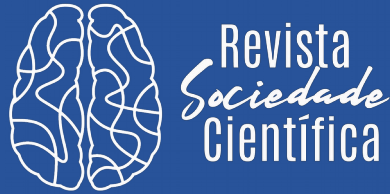
Os valores mais representativos estão nas pênadas de primavera (setembro-outubro), em Torres, semelhantemente com o ocorrido em Pelotas (estações do Campus da UFPel e CPACT/EMBRAPA). É importante lembrar que, tendo em vista as características pontuais dos ventos, os resultados apresentados têm validade para o local onde se encontra a estação meteorológica e suas vizinhanças (loais próximos e de mesma topografia).

É sabido que a área do rotor dos motores eólicos é frequentemente muito superior a 1m^2 , o que aumenta consideravelmente os potenciais eólicos. Na Tabela 2 estão representadas as estimativas do potencial eólico, a 10, 30, 50, 100 e 140 metros do solo, para diversas áreas de rotores, com a velocidade média diária de $2,183\text{m/s}$, estimada para Torres, RS, no conjunto dos 10 anos de observação.

TABELA 2 – Potenciais eólicos (kW) estimados para diversas áreas de rotores a diferentes alturas do solo, considerando-se a velocidade média diária de $2,183\text{ m/s}$, registrada a 7 metros o solo, em Torres, RS.

| Área do rotor(m^2) | Altura do solo(m) | | | | |
|-------------------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
| | 10 | 30 | 50 | 100 | 140 |
| 5 | 0,01173 | 0,01878 | 0,02338 | 0,03147 | 0,03635 |
| 10 | 0,02345 | 0,03757 | 0,04676 | 0,06294 | 0,07270 |
| 15 | 0,03518 | 0,05635 | 0,07014 | 0,09441 | 0,10905 |
| 20 | 0,04691 | 0,07513 | 0,09352 | 0,12589 | 0,14541 |
| 30 | 0,07037 | 0,11270 | 0,14028 | 0,18883 | 0,21811 |
| 40 | 0,09382 | 0,15027 | 0,18704 | 0,25177 | 0,29082 |
| 50 | 0,11728 | 0,18784 | 0,23380 | 0,31471 | 0,36353 |
| 100 | 0,23456 | 0,37568 | 0,46761 | 0,62943 | 0,72705 |
| 150 | 0,35184 | 0,56352 | 0,70141 | 0,94415 | 1,09058 |
| 200 | 0,46912 | 0,75136 | 0,93522 | 1,25887 | 1,45411 |

Para o aproveitamento do potencial eólico disponível em Torres é importante o conhecimento da direção predominante do vento, principalmente no dimensionamento e localização das Torres.



Equipamentos modernos possuem um sistema de modificação de posicionamento, permitindo um melhor aproveitamento do vento. Na aquisição dos equipamentos deverá se levar em conta à existência de proteção contra danos causados por possíveis rajadas de vento [3], no Campus da UFPel, em Pelotas, encontraram uma apreciável probabilidade (superior a 60%) de ocorrência de rajadas de vento, de agosto a dezembro, com velocidades superiores a 60 km/h, principalmente no mês de outubro.

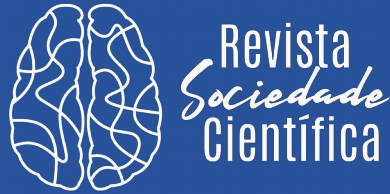
4 CONCLUSÕES

As estimativas iniciais obtidas do potencial eólico, nos níveis de probabilidade de 25, 50 e 75%, apresentam-se como adequadas para diversas atividades agrícolas e turísticas na localidade em apreço. A localidade de Torres comprova a indicação de regiões favoráveis ao uso da energia eólica, expressada no Mapa do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul.

As informações obtidas pelo trabalho constituem um subsídio para estudos mais aprofundados sobre a possibilidade de implantação de uma usina geradora de energia eólica na região.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BAPTISTA DA SILVA, J. ; BURGUEÑO, L.E.T. **Estimativa do potencial eólico a partir de tabelas de probabilidades da velocidade média pentadal do vento, na Cascata, em Pelotas – RS.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.9, n.2, p.333-338, 2001.
- [2] 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.



- [3] 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, 1997.
- [4] COCHRAN, W.G. **The distribution of the largest of a set estimated variances as a fraction of their total.** Annals of Eugenics, v11, p. 47 – 51, 1941.
- [5] DIXON WJ, MASSEY Jr. FJ. **Introduction to statistical analysis.** Tokio: McGraw-Hill Kogakusha Ltda. 1969: 639.
- [6] FISHER, R. A. **Statistical methods for research workers.** 8 ed. London: Oliver and Boyd, 1941. 35p.
- [7] MACINTYRE, A.J. **Máquinas motrizes hidráulicas.** Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1983, 53p.
- [8] SHAPIRO, S.S.; WILK, M. B. **An analysis of variance test for normality (complete samples).** Biometrika, Vol. 52, No. 3/4.(Dec., 1965), pp. 591-611.
- [9] TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.J.L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras.** Editora Nobel, São Paulo, 1980, 374p.