



ANÁLISE DE DADOS DA VELOCIDADE DO VENTO E POTENCIAL EÓLICO NA CIDADE DO RIO GRANDE

Lopes, T. M. F.,

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Física, Avenida Itália, Km 8 S/Nº,
Rio Grande, CEP: 96201900, RS, Brasil, dfstania@super.furg.br

Almeida, J. A.,

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Física, Avenida Itália, Km 8 S/Nº,
Rio Grande, CEP: 96201900, RS, Brasil, jorge@calvin.ocfis.furg.br

Este trabalho almejou a determinação dos fatores de correção para os dados de vento adquiridos pela Fundação Universidade Federal do Rio Grande, no período de 1992 a 1995, através da utilização do método de correção desenvolvido por J. Wieringa que utiliza relações entre o vento médio e a rajada para a determinação dos fatores de correção. Foram encontrados fatores de correção variando de 1,11 a 1,32 conforme o setor considerado. Foi encontrado o valor de velocidade média anual de 3,7m/s a 10m de altura. Também foram determinados os comprimentos de rugosidade por setor, tendo sido encontrados valores entre 0,18 e 0,87m.

Para a densidade de potencial eólico médio a 10m de altura, foi encontrado o valor de 53,4W/m².

1- INTRODUÇÃO

Atualmente, com o crescente interesse em fontes de energia alternativas, o cálculo do potencial eólico das regiões passou a ter uma importância que se enquadra em objetivos não somente econômicos como ambientais. Neste século, a mentalidade ecológica e o receio da falta de petróleo uniram-se para eleger outras fontes de energia como possíveis, não que o homem já não conhecesse algumas delas há longo tempo, porém, passou a pensar mais seriamente na possibilidade de seu aproveitamento em grande escala.

Rio Grande é uma cidade costeira, de aproximadamente 200 mil habitantes, figura importante no panorama regional, visto que, além de ser o único porto marítimo do estado, também se localiza às margens da Lagoa dos Patos, uma das maiores lagoas do mundo. Por sua localização a cidade é beneficiada pelos ventos característicos de localidades à beira-mar.

Para a realização de qualquer trabalho de levantamento de potencial eólico, são necessário dados representativos da localidade e, no caso de dados de ventos, a recomendação da AWEA (American Wind Energy Association) é que os dados sejam obtidos em um “espaço aberto, livre de vegetação e estruturas” e que, se porventura os medidores precisarem ser instalados próximos de alguma obstrução, “a sua localização deve estar a uma distância horizontal de pelo menos dez vezes a altura da obstrução”. De acordo com V.M. Khan et al. que em 1995, em artigo intitulado “Note on the influence of local vegetation upon representativity of routine wind measurements”, os dados de vento oriundos da Estação Meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia, aos cuidados da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, a partir de agora denominada EMINMET. estariam dentro ou aproximadamente dentro desta exigência. Porém, as análises comparativas feitas pelo citado trabalho com dados de vento de outra estação próxima mostram que a recomendação feita pela AWEA não produz o efeito esperado. Assim sendo, este trabalho propõe-se a encontrar fatores de correção para os valores de velocidade do vento medidos pela Estação Meteorológica desta Universidade através do método desenvolvido por J. Wieringa em 1975, bem como, após a correção dos mesmos, analisar o potencial eólico através do modelo de Weibull (Hennessey, 1977).

2- MÉTODOS DE ANÁLISE

2.1- Método de Análise Para o Cálculo dos Fatores de Correção de Wieringa

Em 1975, J. Wieringa, publicou no periódico Quart. J. R. Met. Soc. um artigo intitulado “An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location”, onde propôs um método para aumentar a representatividade das medições feitas em um local onde houvessem elementos que causassem a obstrução do vento, diminuindo o seu módulo em um ponto situado entre o elemento e o anemômetro, tendo o vento o sentido do elemento para o anemômetro. Esse método propõe que as correções sejam feitas através dos dados da estação em si, e não através dos dados de uma estação próxima.

2.1.1- Hipóteses e Conceitos Básicos

2.1.1.1.- Perfil Logarítmico do Vento

Na subcamada inercial atmosférica, que é a parte mais baixa da camada limite planetária com exceção de uma fina camada imediatamente acima da superfície assume-se que a velocidade do vento varia com a altura de acordo com um perfil logarítmico conforme a equação 2.1, na qual determinamos a velocidade do vento em qualquer altura (z_2) em função da velocidade em uma altura de referência (z_1), bem como do comprimento de rugosidade z_0 que é a distância acima do nível do solo onde a velocidade do vento teoricamente deveria ser zero (Sadhu, 1981):

$$U_2/U_1 = \left[\ln\left(\frac{z_2}{z_0}\right) \right] / \left[\ln\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \right] \quad (2.1)$$

onde:

U_2 = velocidade do vento à altura z_2 (m/s)

U_1 = velocidade do vento à altura z_1 (m/s)

z_2 = altura do ponto 2 (altura de referência) (m)

z_1 = altura do ponto 1 (m)

z_0 = comprimento de rugosidade (m)

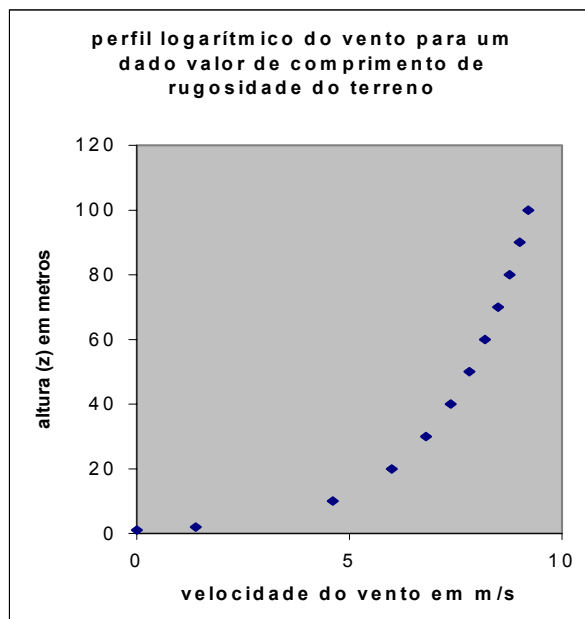


Figura 2. 1 - Perfil logarítmico do vento

O perfil visualizado na figura 2.1, mostra que a velocidade do vento em locais mais elevados é maior do que próxima ao nível do solo, isto se deve ao atrito existente com a superfície da terra. Próximo à superfície, o escoamento encontra maior resistência, portanto a velocidade diminui até se anular. A altura acima do solo onde ocorre este fenômeno se chama de comprimento de rugosidade e este pode ser determinado de várias maneiras: i) à partir de observações da velocidade em duas ou mais alturas diferentes, ii) pela extrapolação da linha reta obtida com as medidas em um gráfico semi-logarítmico até a altura onde a velocidade é zero, iii) à partir de tabelas contendo os valores para vários terrenos típicos, variando de 10^{-5} m para o gelo até 100m em montanhas rochosas (Stull, 1988). O comprimento de rugosidade é uma indicação do efeito coletivo da superfície do terreno e obstáculos (casas, florestas compactas), que levam a uma diminuição da velocidade do vento próximo ao solo.

2.1.1.2 - Altura de Não-Influência das Rugosidades Individuais z_b

Assume-se a hipótese de que à uma certa altura acima do solo denominada z_b , a velocidade do vento não sofre mais a influência dos elementos formadores da rugosidade do solo, e a velocidade é a mesma que possuiria o vento em campo aberto. O valor de z_b não pode ser tomado muito alto, pois, a parte superior do perfil pode ser descaracterizada pela força de Coriolis. Em localidades com elementos causadores de rugosidade de altura máxima de 20 a 30 metros, a altura de não-influência pode ser considerada igual a 60 m.

2.1.1.3 - Determinação da velocidade do vento corrigida a partir dos conceitos e hipóteses assumidos

Supõe-se que a estação em questão esteja situada em um campo moderadamente aberto e uma velocidade média de vento U_s é medida à uma altura z_s , onde o índice “s” indica valores da estação real, e queremos saber qual seria a velocidade média do vento U_r na mesma localidade, em um terreno de referência hipoteticamente plano e limpo à uma altura de referência z_r , com um comprimento de rugosidade arbitrado z_{or} .

A partir da fig. 2.2 é possível determinar U_r conforme a equação 2.3:

$$U_r = U_s \frac{\ln(z_b/z_{or}) \ln(z_r/z_{or})}{\ln(z_s/z_{or}) \ln(z_b/z_{or})} \quad (2.3)$$

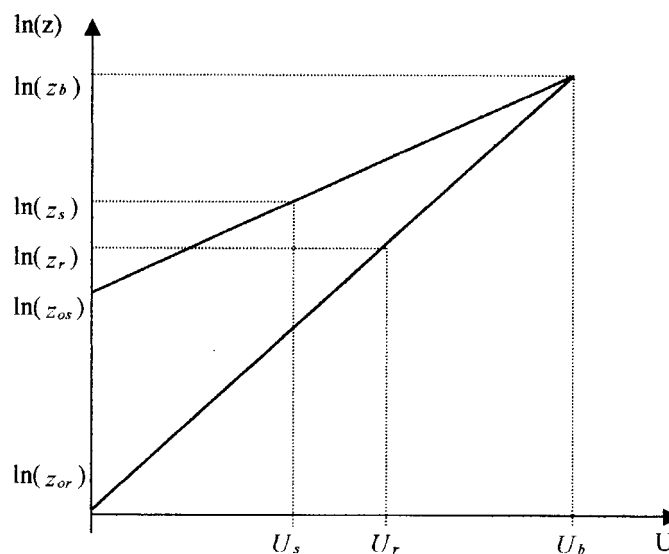


Figura 2. 2- Determinação da velocidade de referência U_r à partir da velocidade conhecida U_s

Para a determinação de U_r , à partir da equação 2.3, todos os valores ou são conhecidos ou podem ser arbitrados como é o caso de z_{or} , o único parâmetro que necessita ser determinado antes da obtenção de U_r , é o comprimento de rugosidade da estação por setor, $z_{os}(\theta)$.

2.1.1.4 – Determinação dos fatores de correção por setor a partir dos valores de rajada medidos na altura de medição da estação anemométrica

Em 1973, um levantamento feito por J. Wieringa, provou que os valores de velocidade de rajadas mudam menos com a altura do que ventos médios. Por rajada, entende-se variações de velocidade do vento de curta duração (em torno de 3 segundos). Baseado nesta constatação, concluiu que a diferença relativa entre valores de rajadas e velocidades médias aumenta à medida que aumenta a rugosidade do terreno, e desenvolveu um método para determinar o comprimento de rugosidade de uma estação anemométrica a partir dos valores de rajada medidos pela referida estação.

Assumindo a aplicabilidade do perfil logarítmico do vento, Wieringa demonstrou que se o intervalo de medição T, possuindo um valor de velocidade média igual à U e o máximo valor de velocidade registrado (rajada) $u_{max}(T,t)$ de duração t, o fator de rajada G que é igual à razão entre u_{max} e \bar{u} pode ser determinado através da equação 2.4

$$\langle G \rangle = 1 + \left\{ 1,42 + 0,30 \ln \left[\left(1000 / \bar{u} t_p \right) - 4 \right] \right\} / \ln(z/z_0) \quad (2.4)$$

onde:

$\langle G \rangle$ é o valor da mediana dos fatores de rajada registrados durante ventos fortes. É preferível a utilização da mediana em vez da média devido à distribuição de G ser afetada pela presença de passagens de frentes e tendências. A equação 2.4 foi deduzida assumindo-se uma distribuição normal para os valores de velocidade de vento, o que só pode ser admitido para ventos acima de 6m/s.

O termo da equação 2.4 onde assumimos que a distribuição ao redor da média é Gaussiana, é a excentricidade da distribuição que é representada por:

$$E = 1,42 + 0,30 \ln \left[\left(1000 / \bar{u} t_p \right) - 4 \right] \quad (2.5)$$

onde $\bar{u} t_p$ é o comprimento de onda da rajada λ

Este valor, ou seja, o comprimento de onda da rajada que corresponde ao período de rajada t_p multiplicado pela velocidade média do vento \bar{u} depende basicamente da capacidade do anemômetro de “seguir” a rajada, isto é, do seu comprimento de resposta L^* (valor característico do instrumento), de maneira que, quanto maior o comprimento de resposta menor é a capacidade do anemômetro de registrar as rajadas que correspondem à uma mudança em degrau da variável velocidade do vento. Wieringa sugere o valor do comprimento de onda de rajada igual à 100, por ser este um valor correspondente à maioria dos anemômetros utilizados em estações meteorológicas. Após a substituição do valor de λ sugerido por Wieringa, o valor de E resulta em 1,96.

Substituindo 2.5 em 2.4 temos que:

$$\ln z_0 = \ln z - E / (\langle G \rangle - 1) \quad (2.6)$$

Substituindo 2.6 em 2.3 chegamos à equação que nos dá os fatores de correção por setor::

$$\frac{U_r}{U_s} = F(\theta) = \left[\frac{(\langle G(\theta) \rangle - 1) \ln(z_b/z_s)}{E} + 1 \right] \frac{\ln(z_r/z_{or})}{\ln(z_b/z_{or})} \quad (2.7)$$

Portanto, o comprimento de rugosidade é apenas um parâmetro intermediário no modelo, pois o mesmo não aparece explicitamente na equação 2.7, porém sua ação se faz notar no valor da mediana do parâmetro $\langle G \rangle$.

2.2- Aplicação dos Métodos

Após a substituição dos valores conhecidos a equação 2.7 se reduz à :

$$F(\theta) = \langle G(\theta) \rangle \times 0,698 + 0,0657$$

sendo que θ foi adotado conforme as condições de semelhança da vegetação ao redor da estação, isto é, foram determinados setores que apresentassem aproximadamente as mesmas características de obstrução ao vento. Estes setores foram determinados através de um levantamento topográfico ao redor do anemômetro da estação cujos dados estão em estudo. Para encontrar $F(\theta)$ para cada setor foi necessário determinar a mediana do fator de rajada $\langle G(\theta) \rangle$ que foi calculada a partir de programas em linguagem Fortran, e que seguiram resumidamente os seguintes passos:

- Separação a partir dos dados de velocidades maiores iguais à 6m/s, suas respectivas rajadas e direções.
- Separação dos dados acima nas direções correspondentes aos setores determinados.
- Cálculo do valor da mediana de $G(\theta)$ por setor sendo que G é a razão entre u_{\max} e U.
- Aplicação dos fatores:

Os fatores de correção foram aplicados aos dados originais por setor, e a seguir, o novo conjunto de dados foi utilizado para os cálculos das velocidades médias e os respectivos desvios padrões, parâmetros da distribuição de Weibull, densidade de potência eólica média e também foram feitas posteriores análises de tendências mensais para as velocidades médias e os citados parâmetros.

2.3-Cálculo da Densidade de Potência Eólica Média Admitindo a Distribuição de Weibull para os Dados

2.3.1- Obtenção dos Parâmetros Necessários para a Obtenção da Função Densidade de Probabilidade Admitindo que o Vento na Cidade de Rio Grande Segue o Padrão da Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma expressão semi-empírica desenvolvida por Ernest Hjalmar Wallodi Weibull, físico sueco que a apresentou em 1939.

Suas formas mais conhecidas são:

$$f_X(x) = \left(\frac{c}{b}\right) \left(\frac{x}{b}\right)^{c-1} \exp\left[-(x/b)^c\right] \quad (2.8)$$

ou

$$f_X(x) = ac x^{c-1} \exp(-ax^c) \quad (2.9)$$

onde:

$f_X(x)$ é a função densidade de probabilidade,

c é o parâmetro de forma (adimensional)

$a^{-1/c} = b$ é o parâmetro de escala em m/s

A distribuição de Weibull possui sua média e seu desvio padrão em termos da função gama (Newland, 1993) conforme:

$$\mu = \left(\frac{1}{a}\right)^{1/c} \Gamma(1+1/c) \quad (2.10)$$

$$\sigma^2 = \left(\frac{1}{a}\right)^{2/c} \left[\Gamma(1+2/c) - \Gamma(1+1/c)^2 \right] \quad (2.11)$$

Se a média da amostra e o desvio padrão são conhecidos, o parâmetro de forma c pode ser estimado a partir de vários métodos (Hennessey, 1977). No presente trabalho, considerando a simplicidade do método de obtenção, bem como os resultados positivos obtidos em estudo realizado para modelar os dados de velocidade de vento da região do Vale do São Francisco (Silva, P. C., 1999), utilizou-se a aproximação (Koepl, 1982; Justus et al, 1977).

$$c = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \quad (2.12)$$

A partir disto o fator de escala pode ser calculado através da equação para a média (2.10), podendo-se obter a curva de distribuição.

O cálculo dos parâmetros de forma, de escala além da assimetria da distribuição ($\sqrt{\beta_1}$) levam ao cálculo do terceiro momento não central através da equação 2.13

$$E(V^3) = \sigma^3 \left[\sqrt{\beta_1} + 3\mu/\sigma + \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^3 \right] \quad (2.13)$$

e também através da equação 2.14

$$E(V^3) = a^{-3/c} \Gamma\left(1 + \frac{3}{c}\right) \quad (2.14)$$

Sendo que β_1 deve ser obtido a partir de uma determinada distribuição de probabilidade. Na distribuição de Weibull a distorção é uma função exclusivamente do fator de forma (Johnson e Kotz, 1970), e é possível o seu cálculo através de (Mirshawka, 1983):

$$\sqrt{\beta_1} = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{3}{c}\right) - 3\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right)\Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) + 2\Gamma^3\left(1 + \frac{1}{c}\right)}{\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{c}\right)\right]^{3/2}} \quad (2.15)$$

O potencial eólico e a densidade de potencial eólico de uma região, são caracterizados pela potência e densidade de potência eólica média, obtida a partir de observações da potência eólica instantânea (Sadhu, 1981) através das equações abaixo, onde ρ_i é a densidade do ar à temperatura instantânea, A é a área perpendicular a direção do vento e v_i a velocidade instantânea do vento.

$$P_i = \frac{1}{2} \rho_i A v_i^3 \quad (2.16)$$

$$p_i = \frac{1}{2} \rho_i v_i^3 \quad (2.17)$$

A equação (2.16) mostra que a determinação da potência eólica depende fundamentalmente da velocidade instantânea do vento (elevada ao cubo). O valor esperado do cubo da velocidade é dado por 2.13 ou 2.14.

Portanto, a densidade de potencial eólico admitindo a distribuição de Weibull pode ser determinada através da equação 2.18

$$p = \frac{1}{2} \rho E(V^3) \quad (2.18)$$

3-DADOS DISPONÍVEIS, INSTRUMENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO

Neste trabalho foram utilizados dados da (EMINMET)

3.1 - Dados Disponíveis da EMINMET

3.1.1- Instrumentação

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos junto ao Departamento de Geociências da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, responsável pela EMINMET, e foram coletados através de um Anemógrafo Universal AH-1000, situado à 10 metros de altura :

Sensor de velocidade do vento:

- Elemento sensor do tipo conchas rotativas com acoplamento ótico.
- Faixa de medição de 0 - 60 m/s
- Incerteza $\pm 0,5$ m/s (de 0 a 5 m/s)
- $\pm 5\%$ (de 5 até 60 m/s)
- Sensibilidade $< 0,5$ m/s
- intervalo de aquisição – 0,5 s
- período de amostragem – 10 min

Sensor de direção do vento

- Pá balanceada com potenciômetro de precisão
- Faixa de medição de 0 - 359°
- Incerteza $\pm 5^\circ$
- Sensibilidade $< 1^\circ$

3.1.2- Série Obtida

O anemógrafo esteve em funcionamento entre 1992 e 1995, porém, devido a problemas técnicos por várias vezes seus registros foram interrompidos, sendo que em março de 1995 foram registrados seus últimos dados. Na tabela 3.1 estão mostrados os números de dados registrados:

Tabela 3. 1- Número de dados mensais de velocidade, direção, rajada e desvio da direção registrados pela EMINMET entre 1992 e 1995

Nº DE DADOS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1992	627	1828	939	772	333	4099	2698	3442	3410	x	x	x
1993	2477	3930	4350	x	4464	4320	3012	3932	1547	3526	3448	3119
1994	810	3088	x	x	2500	363	x	3975	x	4350	2064	620
1995	231	3838	1818	1631	x	x	x	x	x	x	x	x
Total	4145	12684	7107	2403	7297	8782	5710	11349	4957	7876	5512	3739

4-RESULTADOS

4.1- Resultados Encontrados para os Fatores de Correção de Wieringa

Os fatores de correção de Wieringa encontrados por setor estão especificados na Tabela 4.1

Tabela 4.1- Resultados obtidos para os fatores de correção de Wieringa

setor (graus)	$\langle G(\theta) \rangle$	$F(\theta)$
0-40	1,58	1,17
40-75	1,58	1,17
75-100	1,57	1,16

100-140	1,51	1,12
140-150	1,50	1,11
150-191	1,57	1,16
191-230	1,56	1,15
230-234	1,74	1,28
234-270	1,80	1,32
270-290	1,65	1,22
290-320	1,60	1,18
320-337	1,49	1,11
337-360	1,52	1,13

Onde:

$\langle G(\theta) \rangle$ = valor da mediana do fator de rajada para o setor θ

$F(\theta)$ = fator de correção de Wieringa para o setor θ

4.2 – Resultados Obtidos Após a Correção de Wieringa para a Velocidade do Vento

A Tabela 4.2 mostra os resultados obtidos para a velocidade média, coeficientes de Weibull e densidade de potencial médios para os meses do ano.

Tabela 4. 2- Velocidade média, coeficientes de Weibull, densidade de potencial eólico médio a 10 m de altura

mês	velocidade média (m/s)	coeficientes de weibull		densidade de potencial eólico (w/m ²)
		c	b (m/s)	
janeiro	4,1	2,5	4,7	68
fevereiro	4,0	1,8	4,5	83
março	2,8	1,6	3,2	37
abril	3,8	1,9	4,3	66
maio	3,1	1,8	3,5	41
junho	3,3	1,7	3,7	28
julho	3,5	1,7	3,9	61
agosto	3,4	1,7	3,8	38
setembro	4,4	1,9	5,0	107
outubro	3,9	1,9	4,3	69
novembro	4,3	1,9	4,9	99
dezembro	4,1	2,1	4,6	78

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hennessey, J. P., jr., 1977: Some Aspects of Wind Power Statistics. *J. Appl. Meteor.*, **16**, 119-128.
- Khan, V.M., Krusche, N. e Zavialov, P.O., 1995: A Note on the Influence of Local Vegetation Upon Representativity of Routine Wind Measurements. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **10**, 48-53.
- Koepl, G. W., 1982: *Putnam's Power from the Wind*, Van Nostrand, 468 p.
- Mirshawka, Victor, 1983: *Probabilidades e Estatística para Engenharia*, Nobel, 483 p.

- Newland, D.E., 1993: An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, Logman Singapore Publishers, Singapura, 477 p.
- Sadhu, D. B., 1981: *Estudos sobre Energia Eólica*, Dep. de Engenharia Mecânica, *Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.
- Silva, P. C., 1999: *Sistema para Tratamento, Armazenamento e Disseminação de Dados de Vento*, Tese de Mestrado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
- Stull, R. B., 1988: *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 664 p.
- Wieringa, J., 1976: An Objective Exposure Correction Method for Average Wind Speeds Measured at a Sheltered Location. *Quart. J. R. Met. Soc.*, **102**: 241-253.
- Wieringa, J., 1973: Gust Factors Over Water and Built-up Country. *Boundary Layer Meteorology*, **3**: 424-441.

DATA ANALYSIS OF WIND SPEED AND WIND POWER IN RIO GRANDE CITY.

Lopes, T. M. F.,

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Física, Avenida Itália, Km 8 S/Nº, Rio Grande, CEP: 96201900, RS, Brasil, dfstania@super.furg.br

Almeida, J. A.,

Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Departamento de Física, Avenida Itália, Km 8 S/Nº, Rio Grande, CEP: 96201900, RS, Brasil, jorge@calvin.ocfis.furg.br

This work aimed the determination of the factors of corrections to the acquired wind data by the FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE, in the period from 1992 to 1995, through the application of the correction methods developed by J. Wieringa that uses relationships between mean winds and gusts to determinate the correction factors. Correction factors were found varying from 1,11 to 1,32 according to the sector. The annual mean speed value was found 3,7 m/s at 10 m high. The roughness length by sector was also determined, and values have been found between 0,18 and 0,87m.

The wind power density mean was also calculated, where 53,4 W/m² high was the found value.