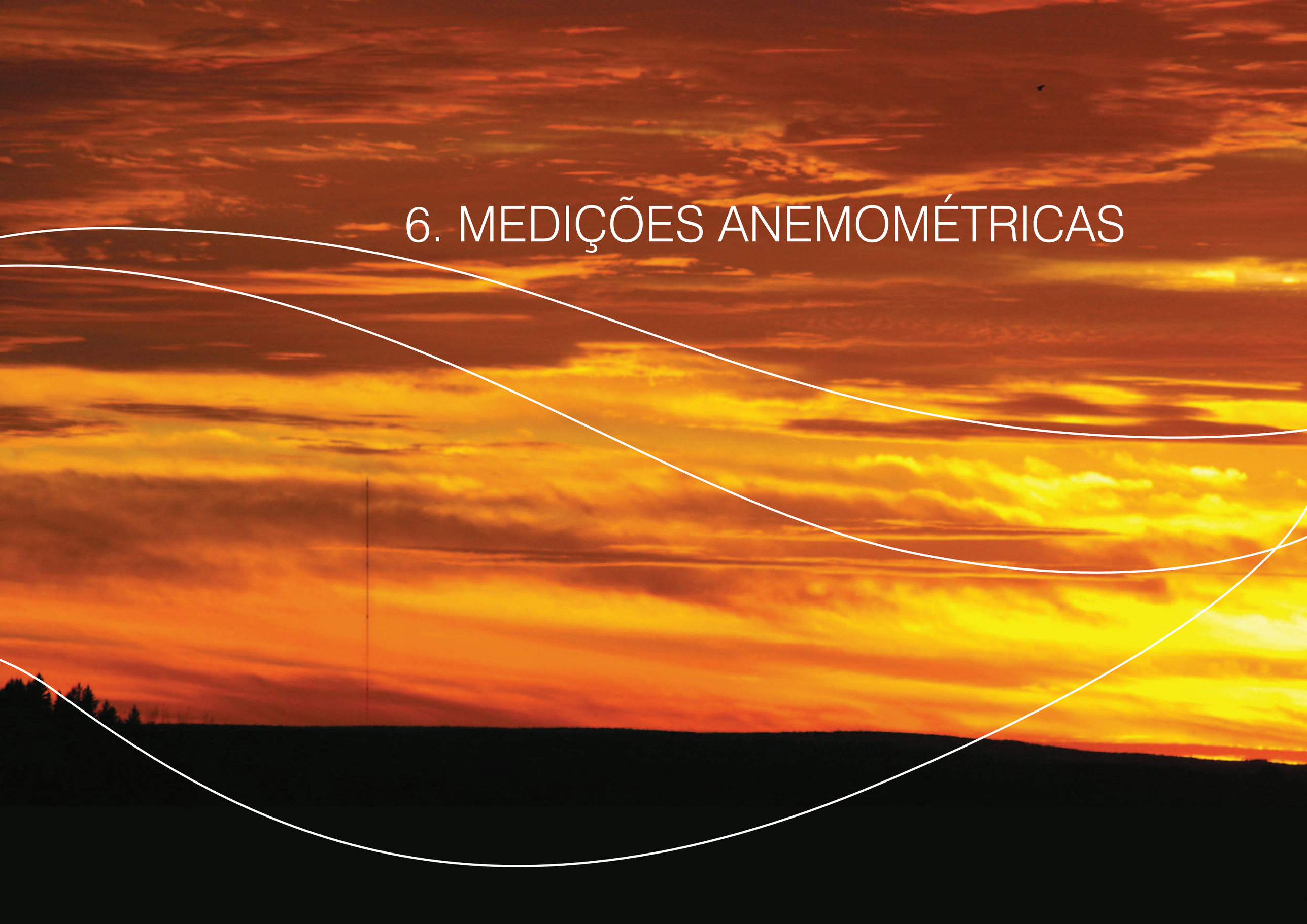


6. MEDIÇÕES ANEMOMÉTRICAS

CAMPANHA DE MEDIÇÕES ANEMOMÉTRICAS

A análise e estudo técnico das séries temporais de vento, coletadas mediante campanha de medição, na região em estudo, é de fundamental importância para corrigir possíveis erros no mapa eólico simulado. As medições de vento usadas para a meteorologia convencional não reúnem as especificações requeridas para serem empregadas na caracterização do potencial eólico. Portanto, a aquisição e o processamento dessas séries devem ser realizadas sempre sob o mais estrito controle de qualidade, utilizando equipamento e metodologias apropriadas.

Neste projeto foram instaladas 7 torres anemométricas, sendo 5 com 75 m de altura e 2 com 100 m. Além disso, os dados de uma torre da EMAE, instalada no alto da Serra do Mar, com 50 m de altura, também foram incluídos na análise.

As torres foram projetadas para uso em energia eólica, e suas dimensões minimizam a interferência nos sensores meteorológicos. As especificações dos sensores e registrador, a montagem dos equipamentos e a configuração do sistema de coleta de dados estão em conformidade com as normas e recomendações internacionais para medição de potencial eólico.

Cada um dos sistemas de coleta automática de dados de vento foi constituído por um registrador de dados (*datalogger*), sensores que medem variáveis eólicas e meteorológicas, sistema de alimentação (energia), sistema de comunicação remota e proteções. As variáveis eólicas medidas são a velocidade e a direção do vento, e a intensidade de turbulência; e as variáveis meteorológicas medidas são a temperatura, a umidade relativa do ar, a pressão atmosférica e a radiação solar.

Os locais para instalação das 7 torres anemométricas foram definidos através de uma avaliação de vários parâmetros: representatividade climática da área, indicativo de potencial eólico bom, proximidade com a rede elétrica, facilidade de acesso e área livre de restrições ambientais. O mapa da página 120 mostra os locais das torres anemométricas do projeto Atlas Eólico de São Paulo. As torres indicadas como ASP01, ASP02, ASP03, ASP04, ASP05, ASP06 e ASP07 foram instaladas e operadas exclusivamente para subsidiar o Atlas Eólico. A torre ASP08 é uma torre existente da EMAE cujos dados também foram utilizados na elaboração deste Atlas Eólico.

> EQUIPAMENTO UTILIZADO

Os instrumentos utilizados neste projeto foram especificados para garantir o máximo de precisão e qualidade nas medições de vento. Nas 5 torres anemométricas de 75 m de altura o sistema de aquisição de dados era composto dos seguintes equipamentos:

- 1 anemógrafo com modem GSM para comunicação remota; marca/modelo: SecondWind/NOMAD2 ou Amonnit/METEO32;
- 2 anemômetros a 50 m e 75 m; marca/modelo: Thies/FirstClass (calibrado);
- 2 sensores de direção a 50 m e 75 m; marca/modelo: Thies/Compact;
- 1 sensor de temperatura; marca/modelo: Vaisala/SWI;
- 1 sensor de pressão atmosférica; marca/modelo: Setra/AB60;
- 1 sensor de umidade relativa do ar; marca/modelo: Vaisala/ HMP50-U;
- 1 piranômetro; marca/modelo: LiCor/LI-200 ou CMP3.

Nas 2 torres anemométricas de 100 m de altura o sistema de aquisição de dados era composto dos mesmos equipamentos e 2 sensores adicionais: 1 anemômetro a 100 m e 1 sensor de direção a 100 m.

Na torre ASP08 da EMAE os instrumentos utilizados eram da marca NRG SYSTEMS. A configuração da torre incluía 2 pares de anemômetro/sensor de direção posicionados a 30 m e 40 m.

> OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Todos os sistemas de medição foram configurados igualmente em termos de alturas dos sensores e parâmetros registrados. Os dados de vento foram amostrados a uma frequência de 1 Hz e integrados a cada 60 segundos. Para a velocidade do vento, por exemplo, foram registrados para cada intervalo de 1 minuto os valores máximos e mínimos e calculados a média e o desvio padrão. A relação completa dos parâmetros configurados nos anemógrafos está apresentada a seguir:

Grandeza	Parâmetro			
	Média	Máxima	Mínima	Desvio Padrão
Velocidade a 100 m	•	•	•	•
Velocidade a 75 m	•	•	•	•
Velocidade a 50 m	•	•	•	•
Direção a 100 m	•			•
Direção a 75 m	•			•
Direção a 50 m	•			•
Umidade relativa a 10 m	•			
Temperatura a 10 m	•			
Pressão atmosférica a 10 m	•			
Radiação solar a 10 m	•			

INSTALAÇÃO DAS TORRES ANEMOMÉTRICAS

As 7 torres anemométricas do projeto são de aço galvanizado, tipo treliçada estaiada, com seção triangular de 25 cm de lado; montadas em módulos de 6 m e 3 m. Âncoras de fixação de 1,75 m e bases de concreto foram utilizadas para sustentação da estrutura e cabos estais. As torres possuem sistema de balizamento, fixado no topo, com iluminação alimentada por baterias carregadas por um painel solar, constituindo assim uma unidade autônoma.

O sistema de aterramento das torres, proposto pela EMAE, não utiliza barras nem cabos de cobre, e sim a própria estrutura da torre e os estais como condutores. Além disso, para garantir uma área de segurança em torno da base e das âncoras de fixação dos estais, utilizou-se uma estrutura auxiliar de cabos de aço enterrados em círculos na base da torre e em cada uma das âncoras. Na base, os cabos formam um círculo com 2 m de raio, e são enterrados a 50 cm de profundidade. Além disso, os cabos são ligados à base e ainda dobrados e enterrados a 2 m de profundidade em dois pontos equidistantes 1 m do centro. Nas âncoras, os cabos formam círculos de 1 m de raio, enterrados a 50 cm de profundidade e ligados a todos os cabos do estaiamento.

O posicionamento da torre foi ajustado de forma que uma das faces fosse o mais perpendicular possível à linha do norte geométrico (NG). Nessa face, foram posicionados o sensor de radiação solar (piranômetro), o painel fotovoltaico que alimenta as baterias do registrador e o painel fotovoltaico do sistema de balizamento.

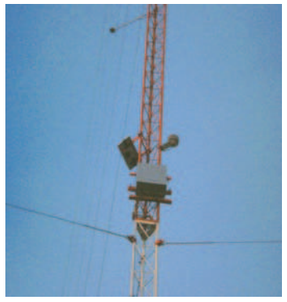
As hastes de suporte dos anemômetros e dos sensores de direção, em forma de um "L" deitado, com dimensões de 1,65 m e 0,50 m e diâmetro de 0,04 m, foram instaladas nas direções nordeste e sudoeste. Em cada local ajustes foram realizados em função da declinação magnética. Um mapa da declinação magnética de todo o estado é apresentado na página 120. Os valores de declinação magnética para o dia 1º de outubro de 2012 foram produzidos a partir de dados do programa Geomag 7.0, que incorpora o modelo IRGF (International Geomagnetic Reference Field), versão 11 (válida entre 1900-2015). Esse programa é distribuído gratuitamente pela International Association of Geomagnetism and Aeronomy - IAGA.

> TORRE ANEMOMÉTRICA DE 75 M

Torre de 75 m

Sensores de velocidade e direção

Sensores a 50 m

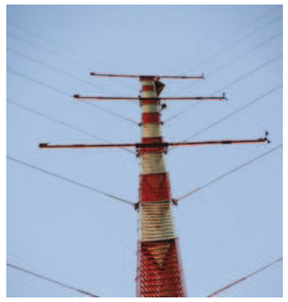


Anemógrafo e sensores meteorológicos

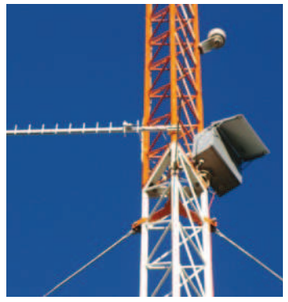
> TORRE ANEMOMÉTRICA DE 100 M

Torre de 100 m

Sensores no topo



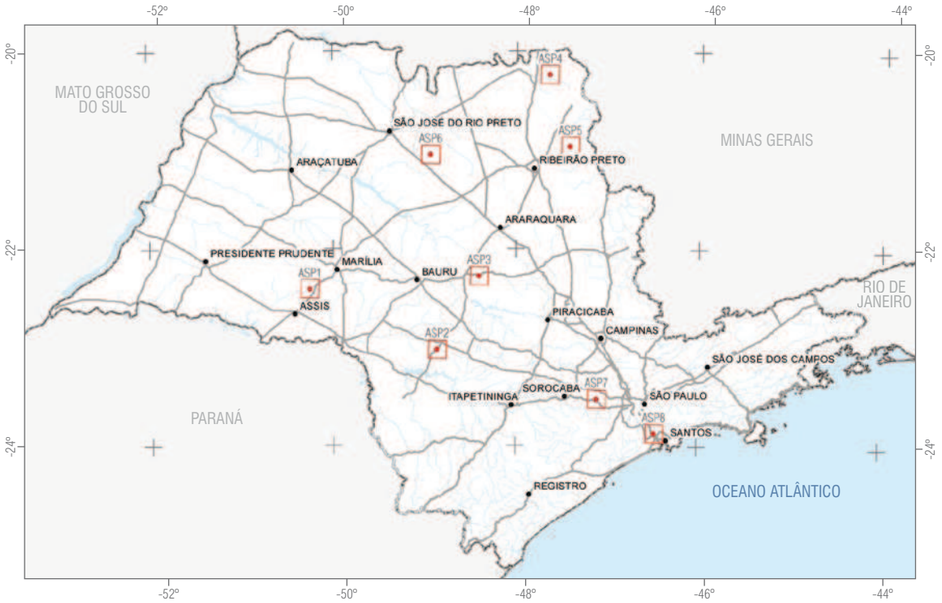
Sensores de velocidade e direção



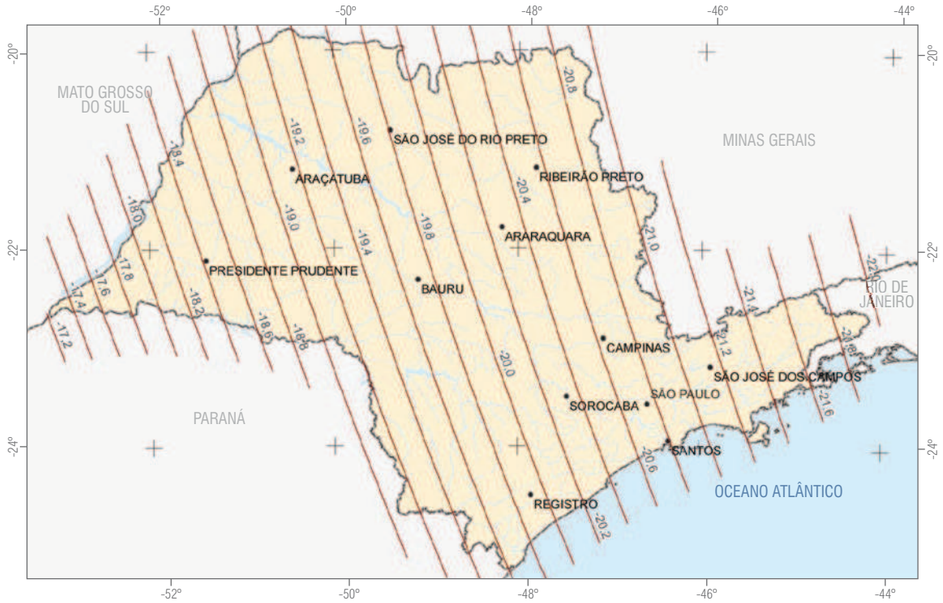
Anemógrafo e sensores meteorológicos

IMAGENS DA INSTALAÇÃO DAS TORRES ANEMOMÉTRICAS

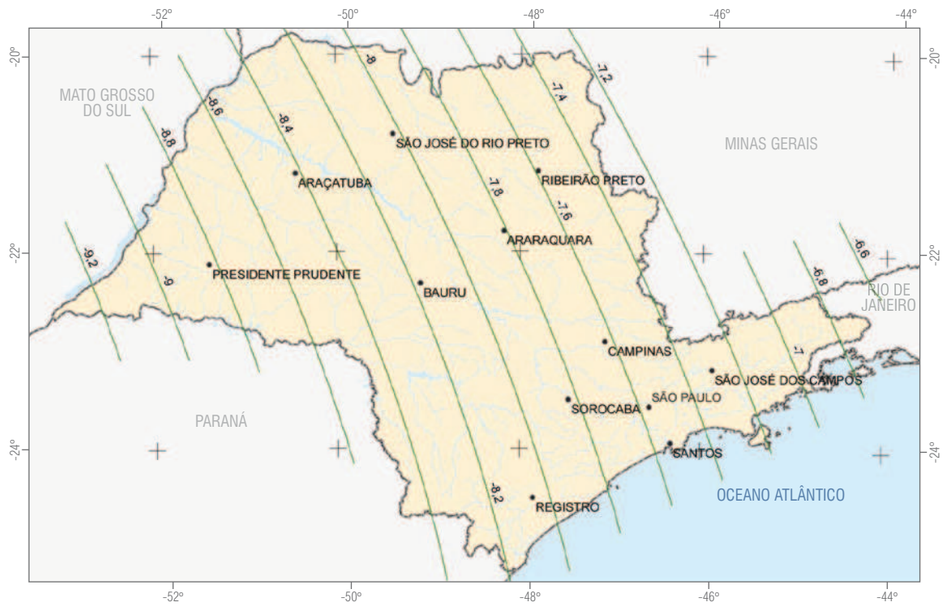
LOCALIZAÇÃO DAS TORRES ANEMOMÉTRICAS



DECLINAÇÃO MAGNÉTICA

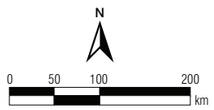


VARIAÇÃO MAGNÉTICA



LEGENDA

- Cidade
- Torre
- Área de Influência da Torre
- Declinação Magnética
- Variação Anual
- Rodovia
- Hidrografia
- Limite Estadual



Projeção: Cônica Equivalente de Albers
Meridiano Central: -49 | Paralelos padrão: -21 e -24
Datum: SAD69

Fonte: Consórcio Bioventos

CARACTERIZAÇÃO DO VENTO

A caracterização da climatologia de um local requer o tratamento estatístico dos dados coletados por estações anemométricas. Em aplicações eólicas, os principais parâmetros estatísticos utilizados são a velocidade média anual do vento, que é a média aritmética da velocidade do vento no período de 12 meses; a variação diurna da velocidade de vento, a rosa dos ventos; e a distribuição de Weibull. Esses parâmetros eólicos, descritos em mais detalhes a seguir, foram calculados para cada local da campanha de medição do vento e são apresentados neste capítulo.

> VARIAÇÃO DIURNA DA VELOCIDADE DO VENTO

A variação diurna, ou diária, da velocidade do vento ocorre principalmente devido à variação do aquecimento solar da superfície da terra no ciclo de 24 horas. É muito comum os locais apresentarem uma variação diária da velocidade do vento bastante definida, indicando a relação entre a velocidade do vento e a hora do dia.

O gráfico da variação diurna da velocidade do vento mostra a média aritmética de todos os dados medidos para cada hora do dia. Essas informações permitem avaliar os períodos de maior probabilidade de disponibilidade de energia para análises de integração energética e controle de geração.

> ROSA DOS VENTOS

O vento varia continuamente, tanto em intensidade quanto em direção. As mudanças na direção do vento são determinadas por duas razões principais. A primeira é sazonal, devido à circulação geral dos ventos, e a segunda é devido às variações diárias e de períodos curtos ocasionadas por mudanças nas condições do tempo e aquecimento/resfriamento do ar na superfície.

O conhecimento da rosa dos ventos de um local é importante para o projeto do arranjo geométrico do parque eólico, isto é, para a localização dos aerogeradores, assim como para o cálculo do desempenho do parque eólico.

O gráfico da distribuição de frequência de ocorrência de direção de vento (Rosa dos Ventos) apresenta a frequência percentual de ocorrência do vento por setores de direções, neste caso representados por 12 setores de 30º.

> DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

O setor eólico faz uso da distribuição de Weibull como modelo estatístico para representar a distribuição de frequência de ocorrência da velocidade do vento de forma mais eficiente possível. Com apenas dois parâmetros, k e c, a distribuição de Weibull é expressa matematicamente por:

$$f(v) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)\right]^{k}$$

onde:
$f(v)$ = frequência de ocorrência da velocidade do vento v;
v = velocidade do vento (m/s);
k = fator de forma (adimensional);
c = fator de escala (m/s).

O gráfico da distribuição de Weilbull mostra a curva da função probabilidade de ocorrência de velocidade e o histograma de velocidade de vento construído com os dados medidos. Existem vários métodos para se ajustar o modelo de Weibull aos dados medidos, neste trabalho utilizou-se o Método da Energia Equivalente, desenvolvido no Brasil.

A partir da distribuição de Weibull, pode-se obter duas distribuições especiais, a distribuição exponencial, para k=1, e a distribuição de Rayleigh, para k=2. A distribuição de Rayleigh foi muito usada na Europa e Estados Unidos, pois grande parte dos dados de vento já coletados em locais de média-alta latitude são bem representados por essa distribuição estatística. Entretanto, na maioria dos lugares do mundo, como no Brasil, o vento é melhor representado com a distribuição de Weibull.

A distribuição culmulativa de Weibull, $F(v)$, que fornece a probabilidade de ocorrência de velocidades de vento maiores que a velocidade v, é dada pela equação:

$$F(v) = exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right)$$

Vários parâmetros podem ser facilmente calculados usando as relações matemáticas da distribuição de Weibull. Por exemplo, os parâmetros eólicos velocidade média do vento, media cúbica e variância são expressos por:

Velocidade média: $c \cdot \Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$

Média cúbica: $c^3 \cdot \Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)$

Variância: $c^2 \cdot \left[\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)\right]$

onde $\Gamma(x)$ é a função gama.

A densidade de potência do vento é proporcional à média cúbica da velocidade do vento e pode ser calculada com a distribuição de Weibull pela equação:

$$DP = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)$$

onde:
DP = densidade de potência (W/m²);
ρ = massa específica do ar (≅ 1,07 kg/m³ para uma temperatura média de 23ºC a 500 m acima do nível do mar).

E a velocidade do vento em que ocorre o máximo conteúdo energético é dada por:

$$V_{\max E} = c \cdot \left(1+\frac{2}{k}\right)^{1/k}$$

CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP01

Localização: Echaporã
Altura da torre: 75 m
Período da coleta de dados
de 01/04/2010 a 31/03/2011

Torre Anemométrica ASP01

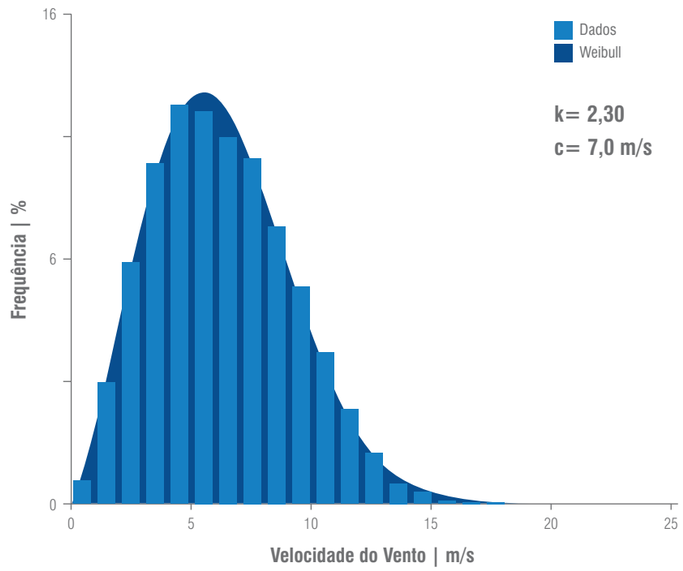
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	5,78 m/s	6,26 m/s
Desvio Padrão	0,45 m/s	0,44 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,30	2,30
Fator de Escala de Weibull, c	6,48 m/s	7,01 m/s

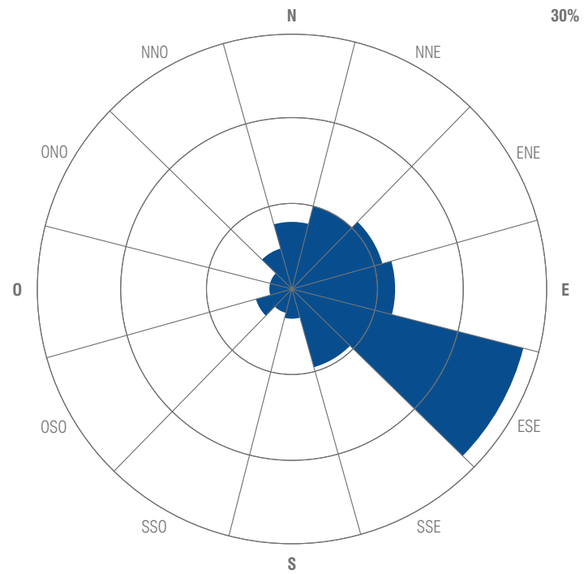
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	24,0 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	66,5 %
Pressão Atmosférica Média	946 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	82,72%
Anemômetro	75 m	82,72%
Sensor de Direção	50 m	82,72%
Sensor de Direção	75 m	82,72%

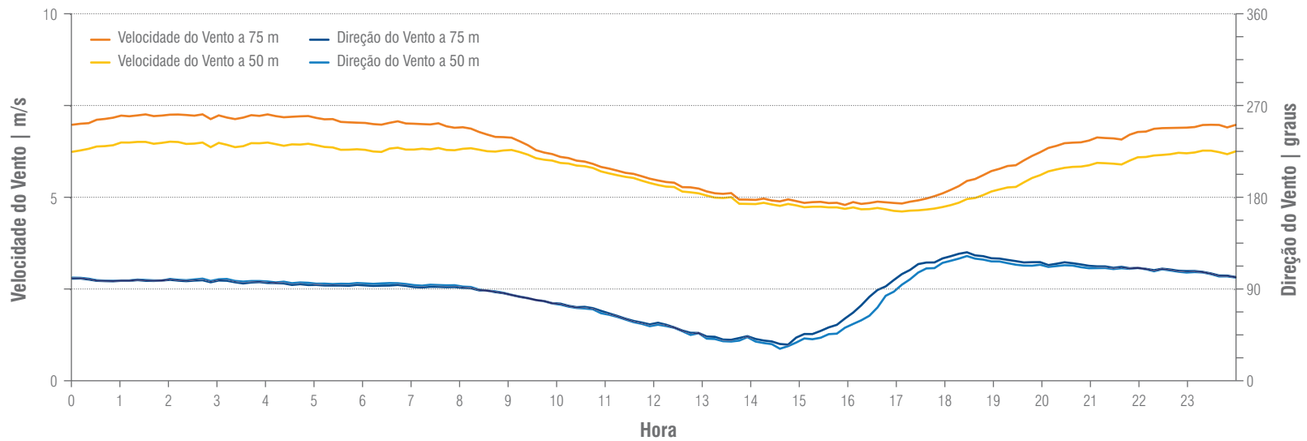
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP02

Localização: Avaré
Altura da torre: 75 m
Período da coleta de dados
de 01/04/2010 a 31/03/2011

Torre Anemométrica ASP02

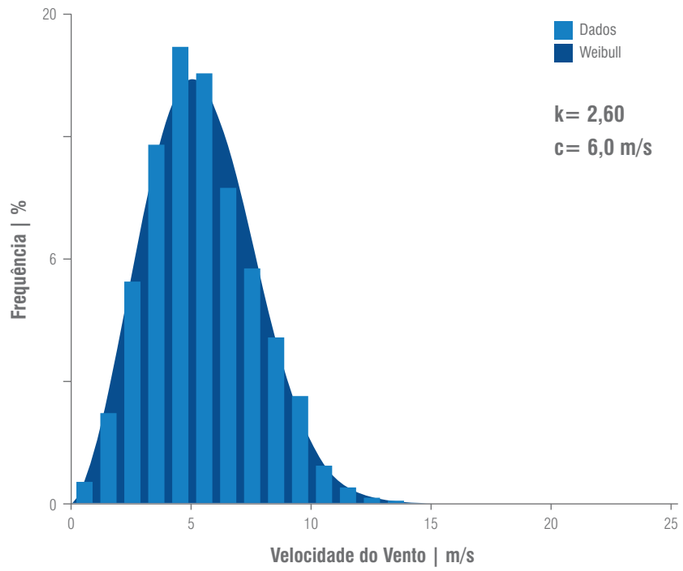
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	4,91 m/s	5,38 m/s
Desvio Padrão	0,40 m/s	0,46 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,40	2,60
Fator de Escala de Weibull, c	5,52 m/s	6,05 m/s

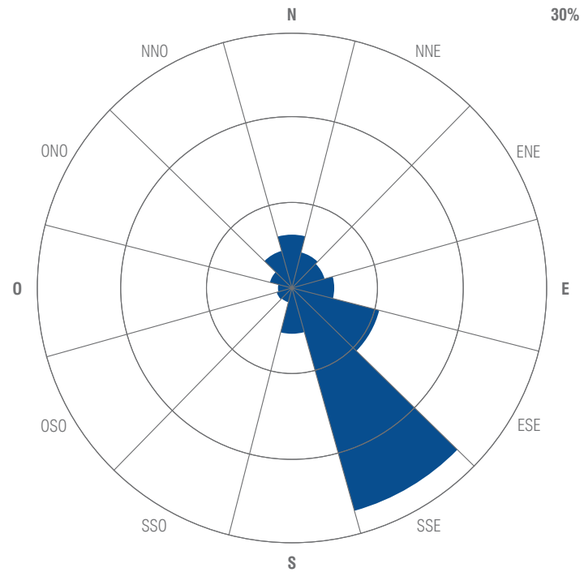
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	21,9 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	73,4 %
Pressão Atmosférica Média	924 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	87,40%
Anemômetro	75 m	87,40%
Sensor de Direção	50 m	87,40%
Sensor de Direção	75 m	87,40%

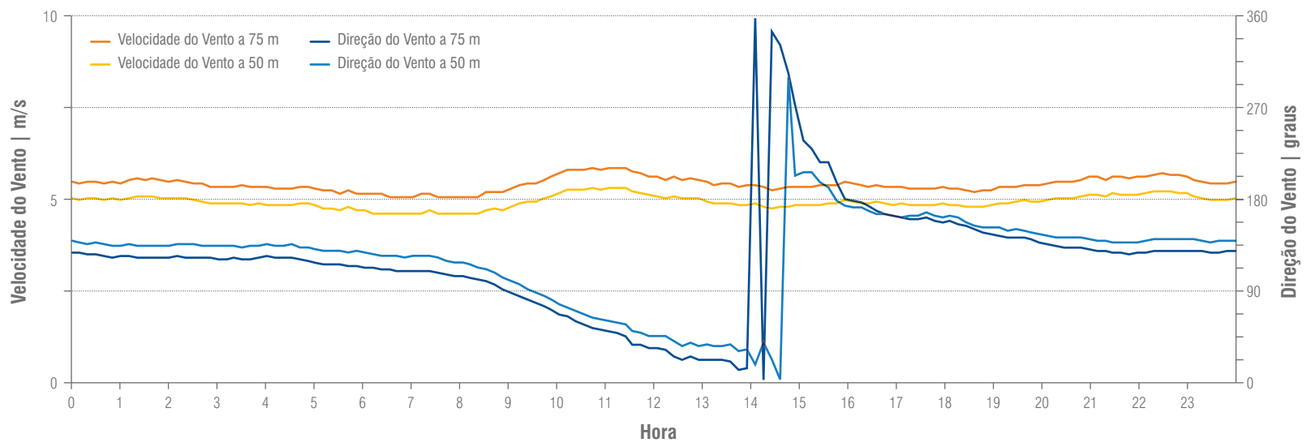
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS

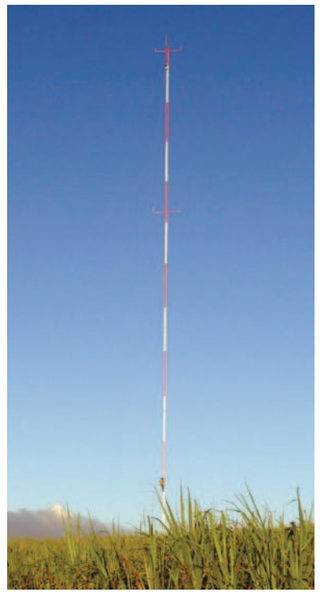


VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP03

Localização: Dois Córregos
Altura da torre: 75 m
Período da coleta de dados
de 01/02/2010 a 31/01/2011



Torre Anemométrica ASP03

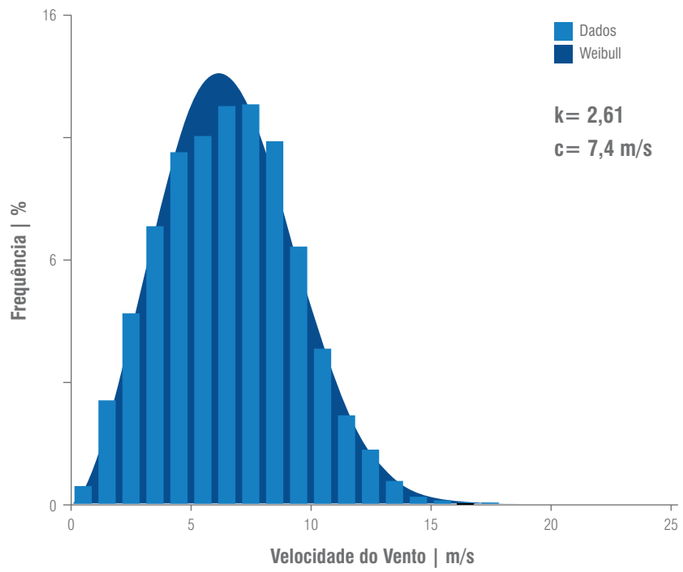
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	6,14 m/s	6,57 m/s
Desvio Padrão	0,44 m/s	0,41 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,70	2,61
Fator de Escala de Weibull, c	6,95 m/s	7,39 m/s

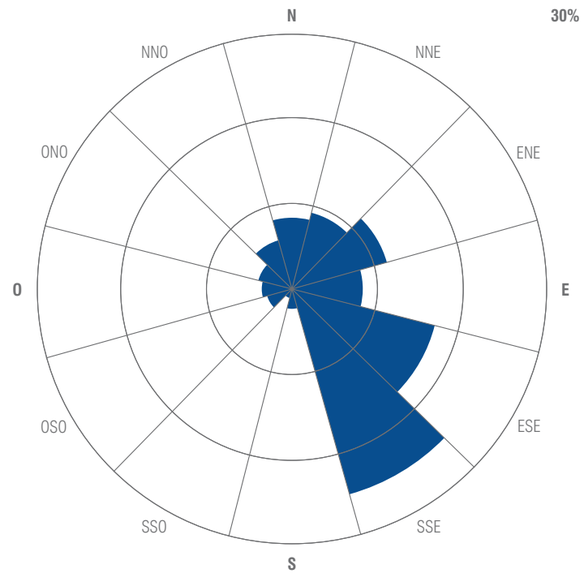
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	21,2 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	92,9 %
Pressão Atmosférica Média	929 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	58%
Anemômetro	75 m	58%
Sensor de Direção	50 m	73%
Sensor de Direção	75 m	73%

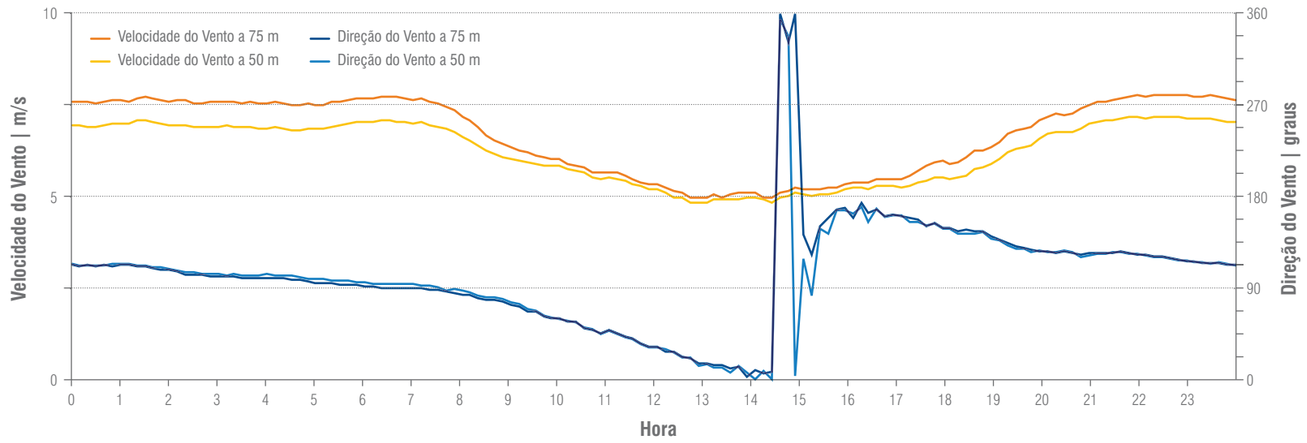
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS

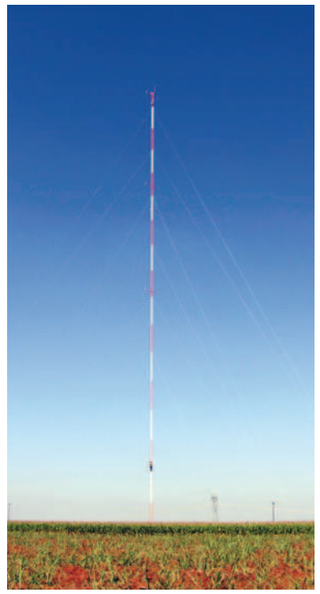


VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP04

Localização: Buritizal
Altura da torre: 100 m
Período da coleta de dados
de 01/02/2010 a 31/01/2011



Torre Anemométrica ASP04

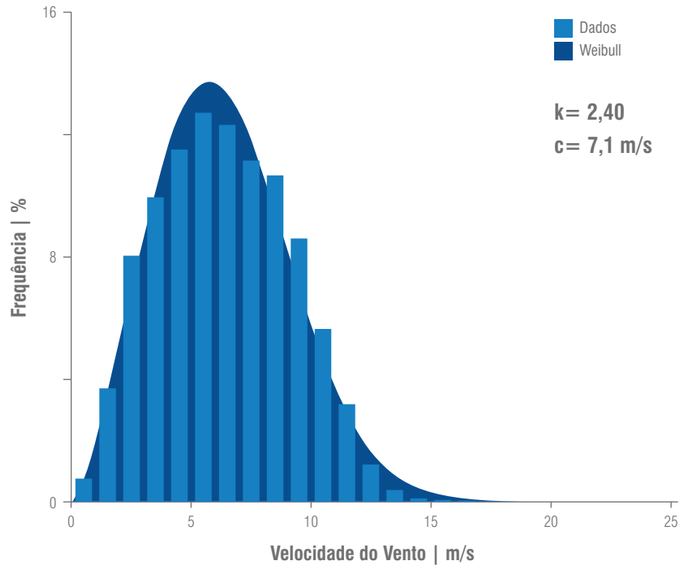
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m	100 m
Velocidade Média	5,60 m/s	6,09 m/s	6,37 m/s
Desvio Padrão	0,35 m/s	0,33 m/s	0,32 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,73	2,56	2,41
Fator de Escala de Weibull, c	6,29 m/s	6,82 m/s	7,13 m/s

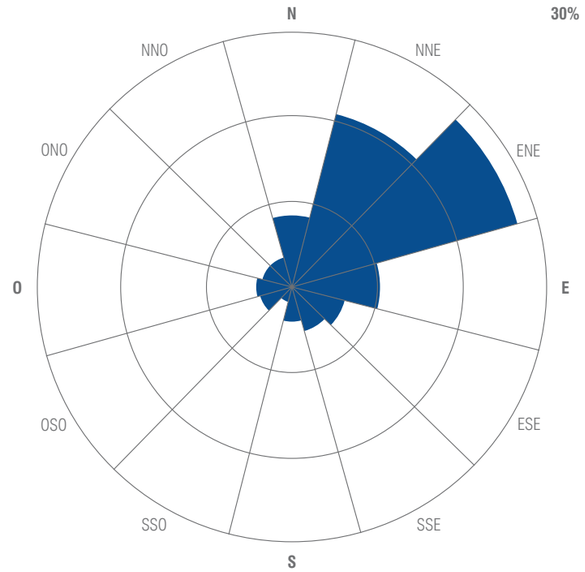
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	22,1 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	58,2 %
Pressão Atmosférica Média	910 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	58,18%
Anemômetro	75 m	58,18%
Anemômetro	100 m	58,18%
Sensor de Direção	50 m	55,73%
Sensor de Direção	75 m	55,73%
Sensor de Direção	100 m	55,73%

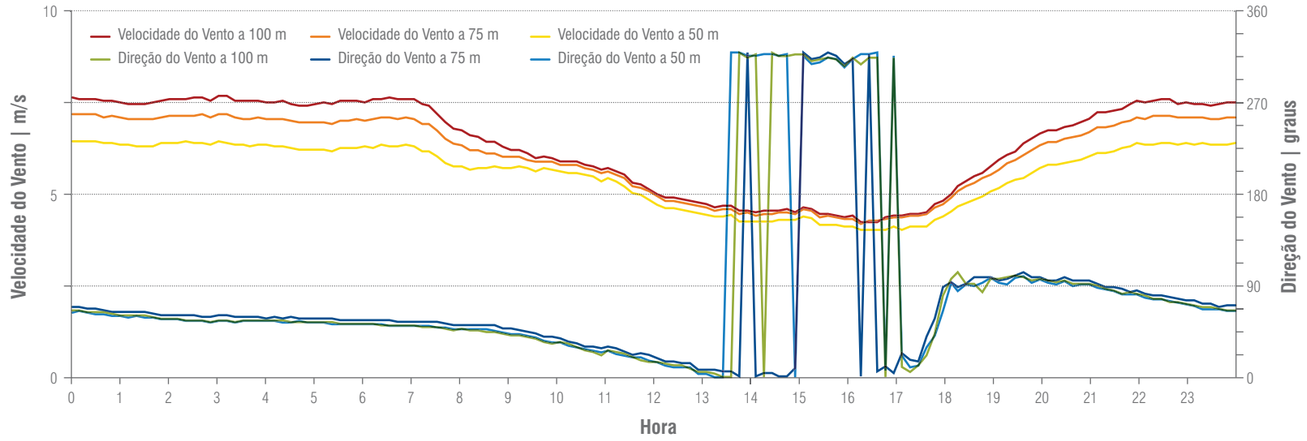
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP05

Localização: Altinópolis
Altura da torre: 100 m
Período da coleta de dados
de 11/04/2010 a 10/04/2011

Torre Anemométrica ASP05

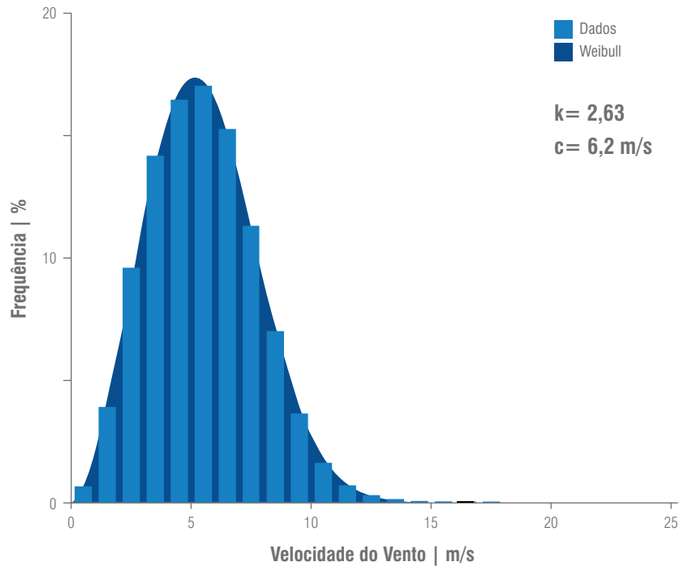
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m	100 m
Velocidade Média	4,68 m/s	5,14 m/s	5,47 m/s
Desvio Padrão	0,34 m/s	0,32 m/s	0,31 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,77	2,72	2,63
Fator de Escala de Weibull, c	5,27 m/s	5,80 m/s	6,17 m/s

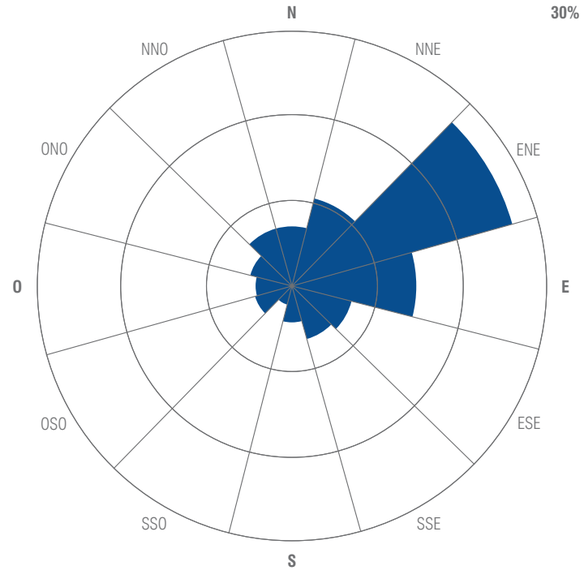
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	20,8 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	65,2 %
Pressão Atmosférica Média	905 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	99,77%
Anemômetro	75 m	99,77%
Anemômetro	100 m	99,77%
Sensor de Direção	50 m	99,77%
Sensor de Direção	75 m	99,77%
Sensor de Direção	100 m	99,77%

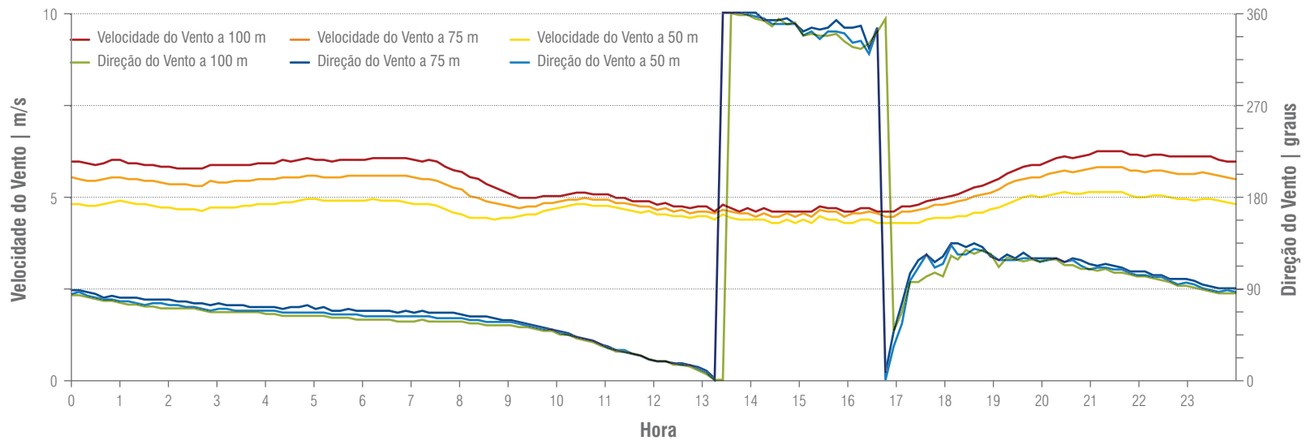
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP06

Localização: Catanduva
Altura da torre: 75 m
Período da coleta de dados
de 01/03/2010 a 28/02/2011

Torre Anemométrica ASP06

Paisagem do local de instalação

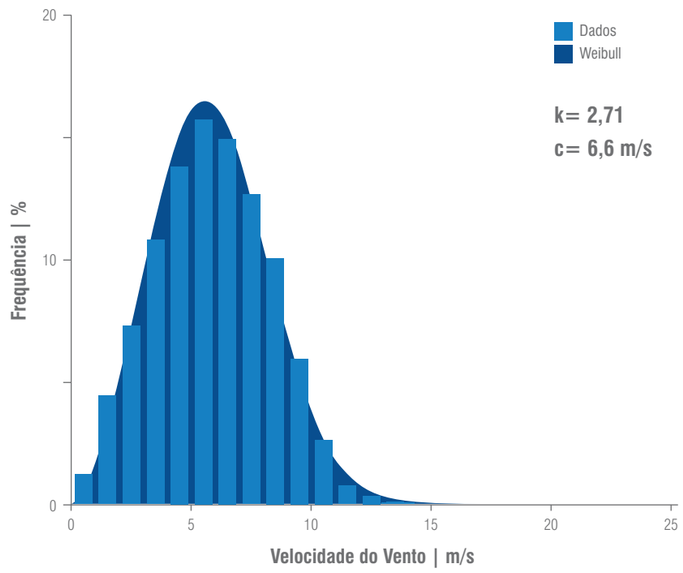
Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	5,57 m/s	5,83 m/s
Desvio Padrão	-	-
Fator de Forma de Weibull, k	2,79	2,71
Fator de Escala de Weibull, c	6,3 m/s	6,6 m/s

Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	21,5 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	-
Pressão Atmosférica Média	953 mbar

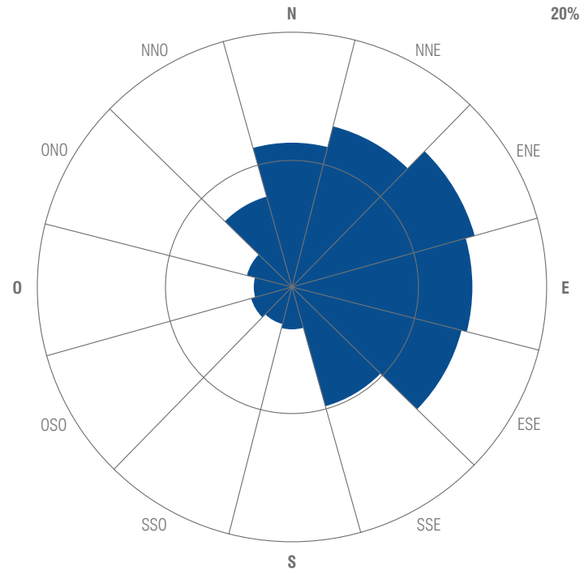
Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	99%*
Anemômetro	75 m	99%*
Sensor de Direção	50 m	99%*
Sensor de Direção	75 m	99%*

**dados simulados com modelos atmosféricos*

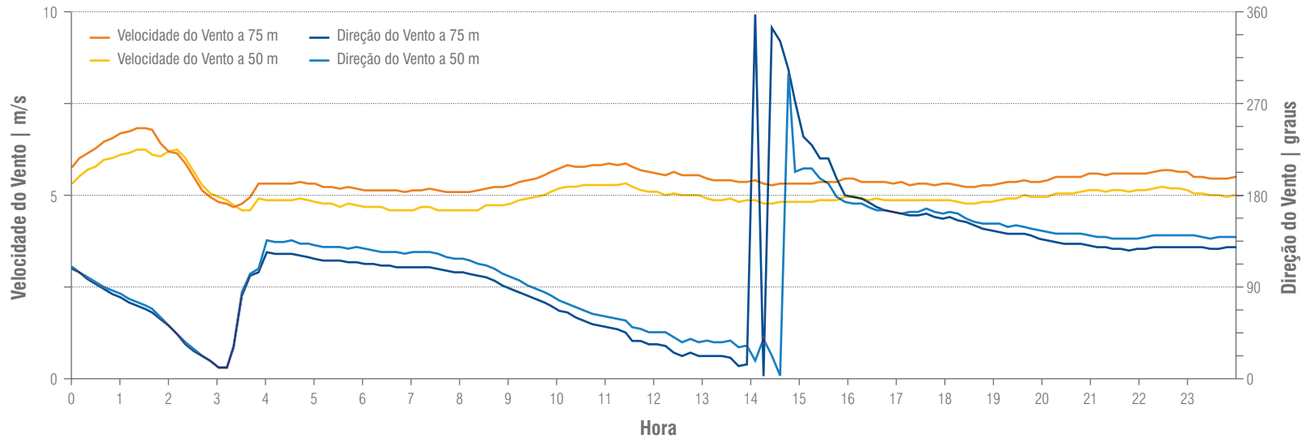
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS

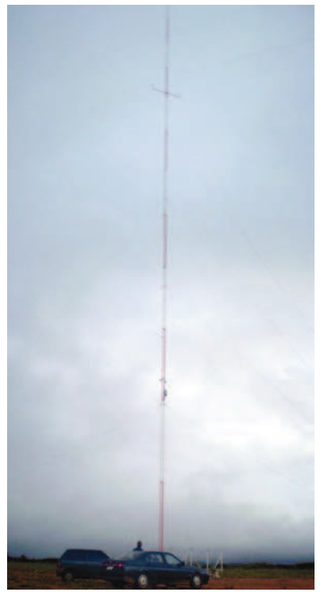


VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP07

Localização: São Roque
Altura da torre: 75 m
Período da coleta de dados
de 10/04/2010 a 09/04/2011



Torre Anemométrica ASP07

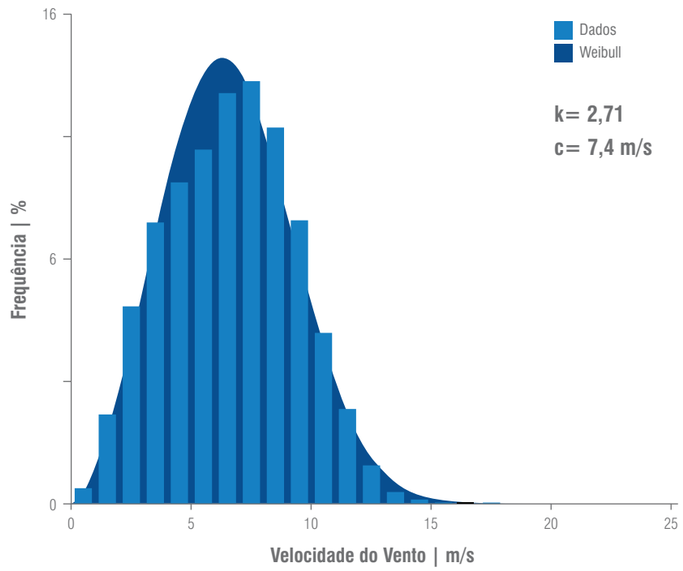
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	50 m	75 m
Velocidade Média	6,13 m/s	6,61 m/s
Desvio Padrão	0,58 m/s	0,54 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	2,79	2,71
Fator de Escala de Weibull, c	6,88 m/s	7,42 m/s

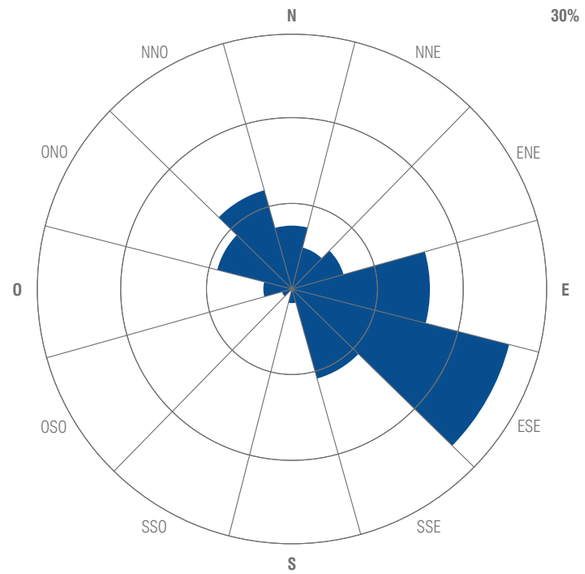
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	17,8 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	78,7 %
Pressão Atmosférica Média	897 mbar

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	50 m	97,89%
Anemômetro	75 m	97,89%
Sensor de Direção	50 m	97,89%
Sensor de Direção	75 m	97,89%

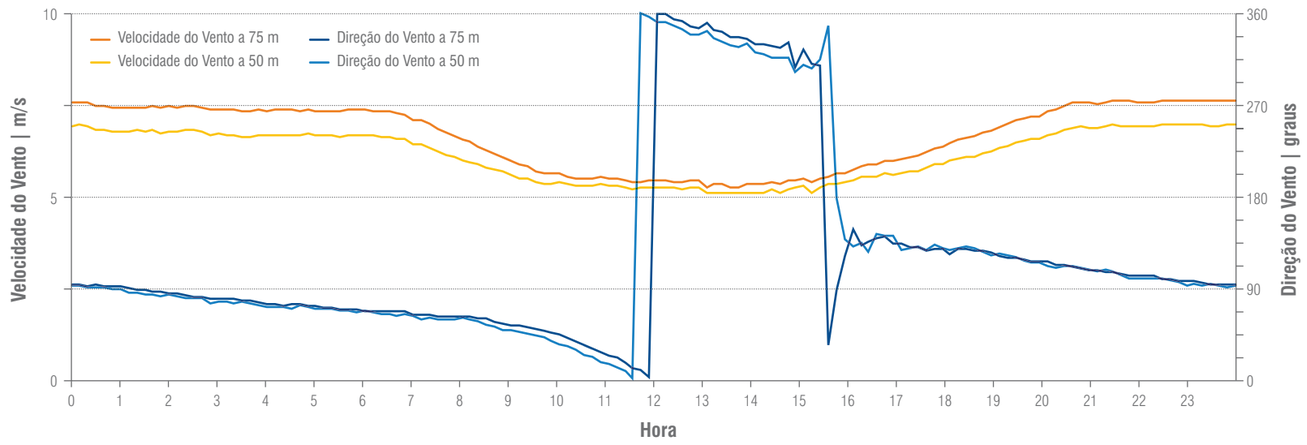
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



CARACTERIZAÇÃO DO VENTO NA TORRE ASP08

Localização: Alto da Serra / Henry Borden
Altura da torre: 50 m
Período da coleta de dados
de 01/05/2008 a 30/04/2009

Torre Anemométrica ASP08

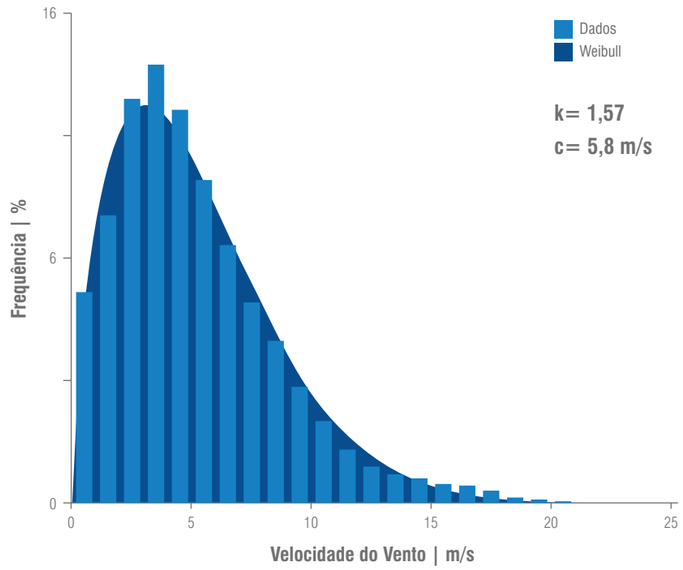
Paisagem do local de instalação

Parâmetros Eólicos	40 m	50 m
Velocidade Média	4,98 m/s	5,11 m/s
Desvio Padrão	0,72 m/s	0,66 m/s
Fator de Forma de Weibull, k	1,58	1,57
Fator de Escala de Weibull, c	5,66 m/s	5,83 m/s

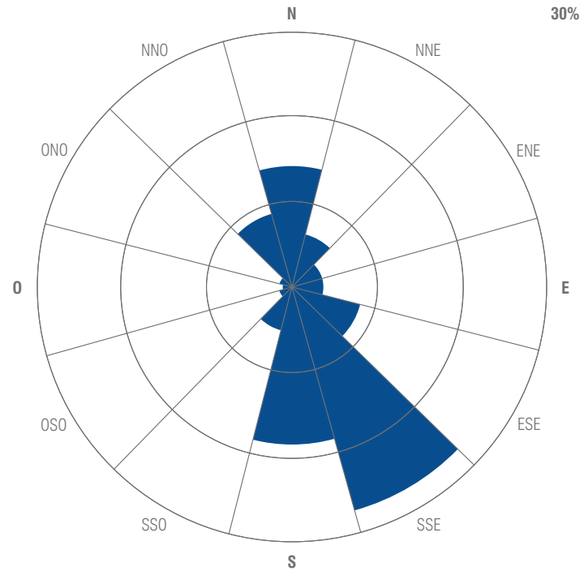
Parâmetros Meteorológicos	
Temperatura Média	18,3 ºC
Umidade Relativa do Ar Média	76,2 %
Pressão Atmosférica Média	-

Taxa de dados válidos	Altura	%
Anemômetro	40 m	99,55%
Anemômetro	50 m	99,55%
Sensor de Direção	40 m	99,55%
Sensor de Direção	50 m	99,55%

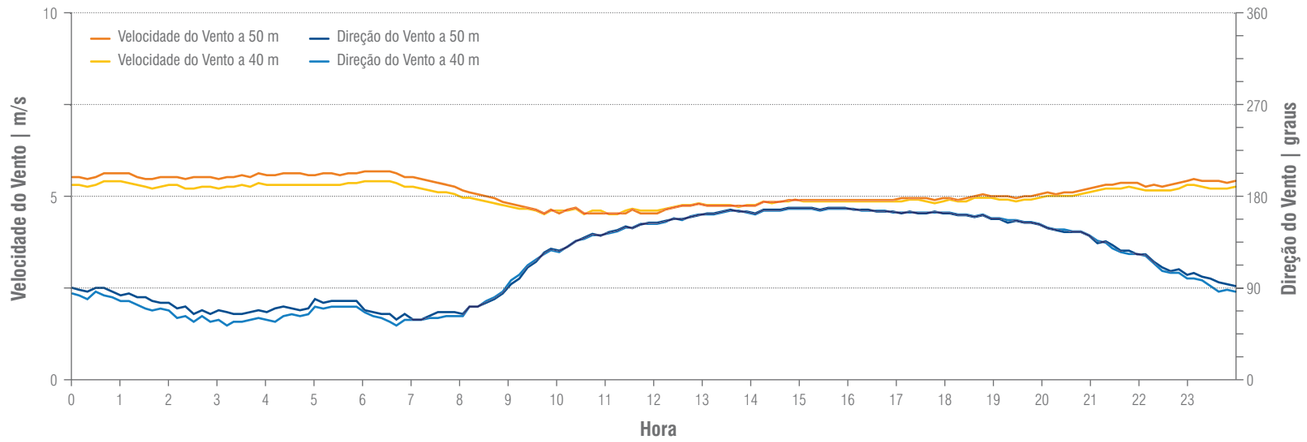
VELOCIDADE DE VENTO E DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL



ROSA DOS VENTOS



VARIAÇÃO DIÁRIA MÉDIA DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DE VENTO



BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ABB. **Wind power plants**, Technical Application Papers, nº 13. 2011.

ANDERSEN, P. D. **Review of Historical and Modern Utilization of Wind Power**. Risø National Laboratory. Roskilde, Denmark, 1998.

BONTEMPS, S.; DEFOURNY, P.; VAN BOGAERT, E. **GLOBCOVER 2009 - Products Description and Validation Report**. Disponível em https://globcover.s3.amazonaws.com/LandCover2009/GLOBCOVER2009_Validation_Report_1.0.pdf

BOWEN, A.J.; MORTENSEN N. G. **WAsP Prediction Errors Due to Site Orography**. Roskilde, Denmark: Risø, 2004.

BOWEN, A.J.; MORTENSEN N. G. **Exploring the limits of WAsP, the wind atlas analysis and application program**. *In* European union wind energy conference. Goteberg, Sweden, 1996.

CHARNOCK, H. **Wind stress on a water surface**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1955. 81: p. 639-640.

CORBETT, J-F.; OTT, S.; LANDBERG, L. **A Mixe Spectral-Integration Model for Neutral Mean Wind Flow Over Hills**. Boundary-Layer Meteorology, 2008. 128: p. 229-254.

CORBETT, J-F.; OTT, S.; LANDBERG, L. **The new WAsP flow mode**l, A fast linearized mixed spectral-integration model applicable to complex terrain. *In* European Wind Energy Conference. Milan, 2007.

DEAVES, D.M. **Wind over hills; a numerical approach**. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1976. 1: p. 371-391.

ESRIN. Disponível em http://ionia1.esrin.esa.int/. Acesso em setembro de 2012.

FEITOSA, E.; PEREIRA, A.L.; VELEDA, D.; SILVA, G.; CAHETÉ, C. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2002. 68 p.

FirstLook Global Wind Dataset Validation White Papers. Disponíveis em http://www.3tier.com/en/about/publications/firstlook-global-wind-dataset-validation-white-papers/.

FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C. F. **Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems**. Part I: Convective parameterization. J. Atmos., Sci., 37, 1722-1733. 1980.

GWEC. **Global Wind Statistics 2011**. Relatório do Global Wind Energy Council (GWEC), 2012.

HUNT, J. C. R. **A theory for the laminar wake of a two-dimensional body in a boundary layer**. Journal of Fluid Mechanics, 1971. 49: p. 159-178.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF GEOMAGNETISM AND AERONOMY. Disponível em http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html . Acesso em: setembro de 2012.

IVANELL, S. S. A. **Numerical Computations of Wind Turbine Wakes**, Technical Report KTH, 2009.

JACKSON, P. S.; HUNT, J. C. R. **Turbulent wind flow over a low hill**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1975. 101: p. 929-955.

JENSEN, N.O.; PETERSEN, E.L.; TROEN, I. **Extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications**. World Meteorological Organisation ,1984.

JOHNSON; G. L. **Wind Energy Systems**. Disponível em http://www.eece.ksu.edu/~gjohnson/, 1985.

KALNAY, E.; *et al*. **The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project**. Bull. Amer. Meteor. Soc., Vol. 77, 1996. p. 437-471.

KISTLER, R.; *et al*. **The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis**: Monthly Means CD-ROM and Documentation. Bulletin of the American Meteorological Society. Vol. 82, nº 2, 2001, p. 247-267

LALAS, D.P. **Wind energy estimation and siting in complex terrain**. International Journal of Solar Energy, 1985. 3(2): p. 43-71.

LIZCANO, G. **Brazilian Wind Assessment Analysis by Means of the ETA-CPTEC and MM5-CBEE Regional Atmospheric Models**. Tese de mestrado, Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE/UFPE. Recife, 1999.

LIZCANO, G.; ROHATGI, J.; FEITOSA, E. **Wind Atlas for the Northeast Region of Brazil**, WANEB. Editado por ANEEL, 1998.

MANNING, J.; HANCOCK, P.E.; WHITING, R. **A terrain modification method for WAsP wind speed prediction over terrain feeaturing flow separation**. *In* European Wind Energy Conference. 2007.

MASON, P.J.; SYKES, R.I. **Flow over an isolated hill of moderate slope**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1978. 105: p. 383-395.

MORTENSEN, N.G.; *et al*. **Wind Atlas and Application Program (WAsP)**, Getting Started. 3rd ed. Vol. 1. Risø, 1993. 30 pp.

MORTENSEN, N.G.; *et al*. **Wind Atlas and Application Program (WAsP)**, Getting Started. 3rd ed. Vol. 2. Risø, 1993. 133 pp.

MORTENSEN, N. G.; BOWEN, A.; ANTONIOU, I. **Improving WAsP Predictions in (too) Complex Terrain**. *In* European Wind Energy Conference. Athens, 2006.

MORTENSEN, N. G.; PETERSEN, E. L. **Influence of topographical input data on the accuracy of wind flow modelling in complex terrain**. Proc. EWEC'97. Dublin, 1997.

Museu Poul la Cour, Dinamarca. Disponível em http://www.poullacour.dk/engelsk/museet.htm. Aceeso em setembro de 2012.

PEREIRA, A. L., FRANK, Helmut. **Wind energy assessment in Brazil - results from the kamm/wasp model**. Anais de EOLICA'98 – Conferência Brasileira de Energia Eólica. Recife, 1998.

RAO, K.S.; WYNGAARD, J.C.; COTE, D.R. **The structure of the two-dimensional internal boundary layer over a sudden change of surface roughness**. Journal of Atmospheric Science, 1974. 26: p. 432-440.

ROHATGI, J.; FEITOSA, E.; PEREIRA, A.L. **Some characteristics of the southeast trade winds in Brazil**. Anais de AWEA'95 – American Wind Energy Conference. Washington, 1995.

SILVA, G.; PEREIRA, A.L.; FARO, D.; FEITOSA, E. **On the Accuracy of the Weibull Parameters Estimators**. *In* European Wind Energy Conference and Exhibition. London, 2004.

SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. **A description of the Advanced Research WRF** Version 2. NCAR Tech. Note/TN-468+STR. 2005. 88 pp.

SMITH, F.T. **Laminar flow over a small hump on a flat plate**. Journal of Fluid Mechanics, 1973. 57: p. 803-824.

SRTM – NASA. Disponível em http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/. Acesso em setembro de 2012.

SYKES, R.I. **An asymptotic theory of incompressible turbulent boundary layer flow over a small hump**. Journal of Fluid Mechanics, 1980. 101: p. 647-670.

TROEN, I.; DE BAAS A. **A Spectral Diagnostic Model for Wind Flow Simulation in Complex Terrain**. *In* European Wind Energy Association Conference and Exhibition. Rome, Italy, 1986.

TROEN, I; PETERSEN, E.L. **European Wind Atlas**. Risø National Laboratory: Roskilde, Denmark, 1989. 656 pp.

UPWIND. **Design limits and solutions for very large wind turbines**. Relatório 21895 do The Sixth Framework Programme for Research and Development of the European Commission.

WAsP 8 Help Facility. Risø National Laboratory, 1987-2005.

WALMSLEY, J.L.; TAYLOR, P. A.; KEITH, T. **A simple model of neutrally stratified boundary-layer flow over complex terrain with surface roughness modulations (MS3DJH/3R)**. Boundary-Layer Meteorology, 1985. 36: p. 157-186.

Western Wind Resources Dataset Validation Reports. Disponíveis em http://wind.nrel.gov/public/WWIS/3TIERValidation/

WRF. Disponível em http://www.wrf-model.org. Acessado em: setembro de 2012.

Crédito das Imagens
Acervo Bioenergy, p. 2, 3, 30, 40, 46, 66, 67, 116
Arcevo Proventos, p. 34
Celso Diniz/Shutterstock.com, p. 12
Eric Gevaert/Shutterstock.com, p. 34
Johan Swanepoel/Shutterstock.com, p. 10
Museu Poul la Cour, Dinamarca, p. 34
Przemyslaw Wasilewski/Shutterstock.com, p. 66 e 67
Ilustrações e gráficos: ZPL Design

Livro impresso sobre
Papel Couchê 150 g/m²
São Paulo | 2012

ISBN 978-85-66444-00-1

9 788566 444001