

DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE DE VELOCIDADE E POTÊNCIA DO VENTO

CLÓVIS ANGELI SANSIGOLO

Divisão de Clima e Meio Ambiente, CPTEC, INPE
Av. dos Astronautas 1758, 12201-970 - São José dos Campos - SP
E-mail: sansigol@cptec.inpe.br

Recebido Janeiro 2004 - Aceito Fevereiro 2005

RESUMO

Visando a determinação do potencial eólico mensal e anual, distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta foram ajustadas aos dados horários de velocidade e velocidade cúbica do vento em Panorama, SP (2000-2002). Foram feitas avaliações comparativas dos ajustes, com os parâmetros das distribuições obtidos pelo método da máxima verossimilhança, usando os testes χ^2 e KS, além de gráficos das probabilidades acumuladas teóricas e empíricas e dos percentis. Verificou-se que a distribuição Beta foi a que melhor se ajustou à maioria dos conjuntos de velocidade do vento (13/14). As distribuições de Weibull e Log-Normal foram as que melhor se ajustaram aos conjuntos de velocidade cúbica do vento (8/14 e 6/14, respectivamente). As estimativas de potência baseadas nos ajustes da distribuição Log-Normal foram sistematicamente superiores (~40%) às feitas pela distribuição de Weibull.

Palavras-chave: potência do vento, distribuições de probabilidade

ABSTRACT: PROBABILITY DISTRIBUTIONS OF WIND SPEED AND POWER

Aiming at the determination of the monthly and annual wind power, Weibull, Log-Normal and Beta distributions were fitted to hourly wind speed and wind speed cubed in Panorama, SP, Brazil (2000-2002). Comparative evaluations of fits, with distributions parameters obtained by the maximum likelihood method, were done using χ^2 and KS tests, besides theoretical and empirical cumulated plots and percentils plots. It was verified that the Beta distribution was the best fitted to the majority of wind speed sets (13/14). The Weibull and Log-Normal distributions were the best fitted to the wind speed cubed sets (8/14 and 6/14, respectively). The wind power estimates based on the Log-Normal distribution fittings were systematically superior (~40%) to those done by the Weibull distribution.

Key words: Wind power, probability distributions

1. INTRODUÇÃO

A maioria dos estudos relacionados à potência dos ventos se concentra no problema do ajuste de distribuições estatísticas aos dados de velocidade do vento (Justus et al., 1976; Van der Auwera et al., 1980; Rehman et al., 1994; Garcia et al., 1998; Nfaqui et al., 1998; Silva et al., 2002; Archer & Jacobson, 2003). Os resultados destes estudos também indicam a distribuição de Weibull como a que melhor se ajusta a estes dados. Pouca atenção tem sido dada ao problema do ajuste de distribuições paramétricas aos dados de potência do vento, diretamente relacionado à determinação do potencial eólico.

A potência do vento é diretamente relacionada à sua velocidade por $P = \rho/2 V^3$, na qual P é a densidade de potência, ρ a densidade do ar e V a velocidade do vento.

Na prática, somente uma parte do potencial eólico total é utilizada pelos geradores. A relação entre potência utilizável e velocidade do vento pode ser visualizada na figura 1.

Segundo esta figura, a potência gerada X pode ser definida como: $X = 0$ para $0 \leq v < V_0$, $X = g(v)$ para $V_0 \leq v < V_1$, $X = P_{\text{máx}}$ para $V_1 \leq v < V_2$ e $X = 0$ para $v \geq V_2$. A função $g(v)$ é monotonicamente crescente de $g(V_0) = 0$ a $g(V_1) = P_{\text{máx}}$. Um modelo estatístico para esta relação entre velocidade do vento e

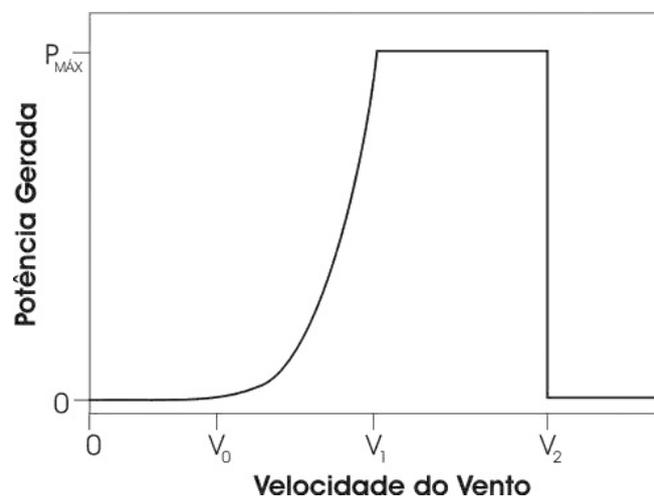


Figura 1: Diagrama típico da curva de potência de um gerador eólico.

potência utilizável deve incluir distribuições de probabilidade discretas e contínuas: $f_x(x) = P_1$ para $x = 0$, $f_x(x) = f_x^*(x)$ para $0 < x < P_{\text{máx}}$ e $f_x(x) = P_2$, nas quais $P_1 = \Pr [x = 0] = \Pr [0 \leq v < V_0] + \Pr [v \geq V_2]$, $f_x^*(x) = f_x^*[g(v)]$ para $V_0 \leq v < V_1$, $P_2 = \Pr [X = P_{\text{máx}}] = \Pr [V_1 \leq v < V_2]$, sob a constrição de $P_1 + \int_0^{P_{\text{máx}}} f_x^*(x) dx + P_2 = 1$.

As probabilidades P_1 e P_2 podem ser facilmente obtidas a partir das distribuições de velocidade do vento, mas a distribuição de $f_x^*(x)$ não, e deve ser determinada empiricamente, ajustando uma distribuição aos dados de potência do vento ou assumindo uma relação entre a distribuição das velocidades do vento e a de potência. A segunda opção é a mais freqüentemente utilizada. Conhecendo-se a distribuição de probabilidade das velocidades do vento $f_v(v)$, as de potência podem ser obtidas tomando-se $X = g(V) = V^3$ e como conseqüência, tem-se que, se as velocidades do vento são modeladas pela distribuição de Weibull, a distribuição das velocidades cúbicas (potência) são teoricamente Weibull (Hennessey, 1977). Esta propriedade da distribuição de Weibull e o aparente bom ajuste aos dados de velocidade do vento tornaram o modelo mais freqüentemente usado em aplicações voltadas ao potencial eólico. A suposição que a distribuição de Weibull é a que melhor se ajusta à potencia do vento (e também às velocidades), como resultado de relações teóricas, deve ser verificada ajustando-se distribuições às velocidades cúbicas do vento. Deve-se notar que, se a distribuição de Weibull não se ajusta perfeitamente às velocidades do vento, esta distribuição não representará o melhor modelo de ajuste para potência.

As distribuições de Weibull e Log-Normal tem sido as mais utilizadas para ajuste de velocidades do vento, conforme constatado em diversos estudos prévios, como os de Justus et al. (1976), Luna & Church (1974), Van der Auwera et al (1980) e Garcia et al. (1998), embora pouca atenção tenha sido dada ao uso de outras distribuições, como a Beta por exemplo, para fins de avaliação do potencial eólico.

Este estudo tem por objetivo uma análise crítica da metodologia envolvida nas estimativas de potencial eólico, avaliando e comparando os ajustes de algumas distribuições de probabilidade, como a de Weibull, Log-Normal e Beta às velocidades v e potências v^3 mensais e anuais do vento em Panorama, SP.

2. DADOS E METODOLOGIA

Os dados utilizados foram velocidades médias horárias do vento na cidade de Panorama (lat.= -21°20', lon.= -51°50' e alt.=324m), no Oeste do Estado de São Paulo, coletadas numa estação meteorológica automática, no período de julho de 2000 a junho de 2002. Foram analisados 2 conjuntos de dados, um para as velocidades médias horárias do vento a 10m e outro para as velocidades cúbicas (potência). Cada um destes conjuntos foi subdividido em 14 outros, um para cada mês, com aproximadamente 1440 dados, um anual considerando todas as direções do vento com 17968 e outro anual, mas só para a direção predominante, com 4580 dados. Distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta foram ajustadas

aos 28 conjuntos de dados. As funções de densidade de probabilidade $f(x)$ e de densidade de probabilidade acumulada $F(x)$ para a distribuição de Weibull são:

$$f(x) = a b x^{b-1} \exp^{-ax^b} \quad (1)$$

$$F(x) = 1 - \exp^{-ax^b} \quad (2)$$

nas quais a e b são, respectivamente, os parâmetros de escala e forma. Os seus momentos de ordem 1 em relação à origem (μ_1') e centrado de ordem 2 (μ_2) são dados por: $\mu_1' = E(x) = \bar{x} = a^{-1/b} \Gamma(1+b^{-1})$ e $\mu_2 = S^2 = a^{-2/b} [\Gamma(1+2b^{-1}) - \Gamma^2(1+b^{-1})]$. Para a distribuição Log-Normal, $f(x)$ e $F(x)$ são dadas por:

$$f(x) = 1/x\sigma_y \sqrt{2\pi} \exp -[(\ln x - \mu_y)^2/2\sigma_y^2] \quad (3)$$

$$F(x) = 1/\sigma_y \sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^x \exp -[(\ln t - \mu_y)^2/2\sigma_y^2] dt \quad (4)$$

nas quais μ_y e σ_y são os parâmetros de posição e escala, respectivamente, a média e o desvio padrão dos logaritmos naturais de x . Os seus momentos μ_1' e μ_2 da distribuição são dados por: $\mu_1' = E(x) = x = \exp(\mu_y + \sigma_y^2/2)$ e $\mu_2 = S^2 = [\exp(\sigma_y^2) - 1] \exp(2\mu_y + \sigma_y^2)$. Finalmente, para a distribuição Beta, $f(x)$ e $F(x)$ são dadas por:

$$f(x) = 1/B(a,b) x^{a-1} (1-x)^{b-1} \quad (5)$$

$$F(x) = 1/B(a,b) \int_0^x t^{a-1} (1-t)^{b-1} dt \quad (6)$$

nas quais a é o parâmetro de escala e b o de forma. Os seus momentos μ_1' e μ_2 são dados por: $\mu_1' = E(x) = a/(a+b)$ e $\mu_2 = S^2 = ab/(a+b+1)(a+b)^2$. O uso da distribuição Beta não é restrito a variáveis definidas no intervalo $[0,1]$. Uma variável Y num intervalo qualquer $[a,b]$ pode ser representada pela distribuição Beta após a transformação $X = (Y-a)/(b-a)$.

Os parâmetros para as 3 distribuições foram computados pelo método da máxima verossimilhança, que na maioria dos casos leva às melhores estimativas (menores RMSE), usando as ferramentas estatísticas do pacote Matlab (Jones, 1997).

Três métodos foram usados para avaliar o ajustamento das distribuições aos diversos conjuntos de dados: o teste do Qui-Quadrado, o de Kolmogorov-Smirnov e gráficos P-P (probabilidades empíricas acumuladas x teóricas acumuladas). Ressalte-se que dados horários de velocidade do vento não satisfazem a hipótese de independência, logo as estatísticas de ajustamento, como os teste do χ^2 e KS, não podem ser usados para se fazer inferências sobre estes ajustes. Estes testes somente permitem avaliações comparativas entre os ajustes para as diferentes distribuições, ou seja, uma certa distribuição pode ou não ser um modelo estatisticamente aceito para os dados, mesmo que ela se ajuste melhor que outras.

As densidades de potência eólica P foram computadas para as distribuições de Weibull e Log-Normal a partir dos parâmetros estimados para as velocidades do vento por $P = \rho/2 E(v^3)$, na qual $E(v^3) = a^{-3/b} \Gamma(1+3b^{-1})$ e $E(v^3) = \exp(3\mu_y + 9\sigma_y^2)$

2), pois estas duas distribuições compartilham a propriedade que o cubo de uma variável aleatória Weibull ou Log-Normal também é uma variável aleatória Weibull ou Log-Normal. Para fins de comparação, as potências P também foram computadas a partir das distribuições das velocidades cúbicas do vento, pois um ajuste imperfeito de v poderia levar a um mau ajuste de v^3 . No caso da distribuição Beta, P foi computada diretamente a partir dos parâmetros estimados para as velocidades cúbicas do vento, pois no caso desta distribuição, o cubo de uma variável Beta não é uma outra variável Beta.

A altura padrão de medida de velocidade do vento para fins climatológicos é 10m, mas a necessidade para fins de potencial eólico pode ser de até 80m, altura central de grandes turbinas. Comumente, as velocidades e conseqüentemente as potências em outras alturas são obtidas a partir do perfil logarítmico do vento ($v_1/v_2 = \ln(z_1)/\ln(z_2)$) ou da lei de potência ($v_1/v_2 = (z_1/z_2)^n$), discutida por Peterson (1978), na qual o expoente pode ter um valor fixo $n = 1/7$, ou ser considerado como variável e dado em função da velocidade do vento (Reed, 1974) e desta com a altura de medida (Justus & Mikhail, 1976), como $n = 0,37 - 0,0881 \ln(v_1)$, para v_1 a 10m. De qualquer forma, as extrapolações de velocidades do vento por meio do perfil logarítmico ou lei da potência, subestimam as reais, pois são para atmosfera neutra. Archer & Jacobson (2003) verificaram que estas sub-estimativas foram, para 87 sondagens nos EUA, de 30 a 70% entre os níveis de 10 e 80m.

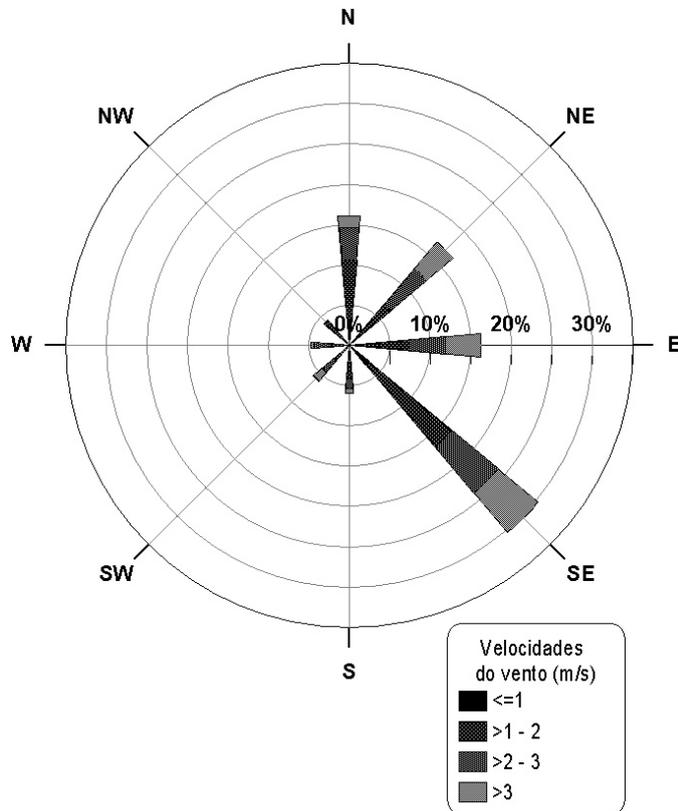


Figura 2: Freqüências das direções e velocidades dos ventos em Panorama, SP

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na figura 2 são apresentadas as freqüências das direções e categorias das velocidades do vento em Panorama, SP. A velocidade média anual a 10m é 2,16 m/s e o desvio padrão 0,32 m/s. A direção predominante é a de Sudeste, em 30,3% do tempo, com um desvio padrão de 8,2%.

Na figura 3 encontram-se as probabilidades empíricas e teóricas acumuladas e os percentis empíricos e teóricos para o conjunto completo das velocidades do vento ajustadas pelas 3 distribuições consideradas. Verifica-se que as distribuições de Weibull e Beta foram as que mais se aproximaram da reta 45°. Este mesmo comportamento também pode ser observado na figura dos percentis, usada para avaliar o comportamento das distribuições nos seus extremos.

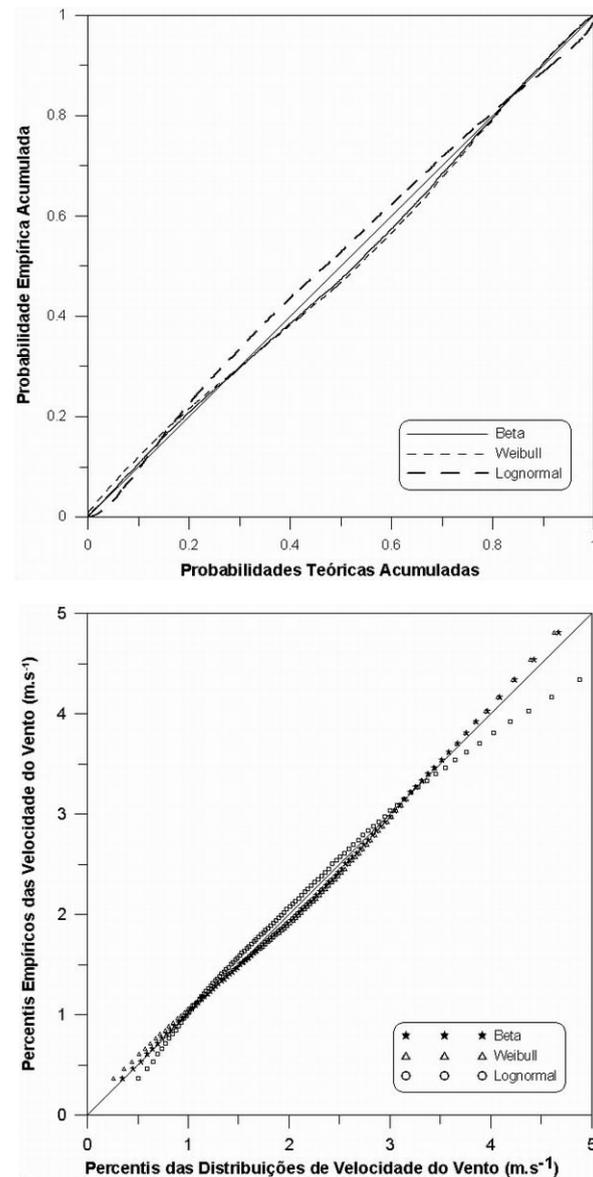


Figura 3: Probabilidades acumuladas (a) e percentis (b) para as velocidades do vento ajustadas pelas distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta.

As estatísticas de ajustamento das 3 distribuições consideradas aos conjuntos mensais e anuais das velocidades do vento encontram-se na tabela 1. A distribuição Beta [0, 10] foi a que melhor se ajustou às velocidades do vento em todos os meses e no ano todo, conforme comprovado pelos 3 métodos usados na verificação. A única exceção ocorreu no caso das velocidades na direção predominante, onde o melhor ajuste foi obtido pela distribuição Log-Normal. A superioridade da distribuição Beta pode ser parcialmente explicada pela sua forma truncada. Impondo um limite superior, 10m/s no caso, equivale a usar uma distribuição de 3 parâmetros e sua comparação com as outras duas distribuições de 2 parâmetros poderia parecer injusta, mas como o limite superior foi escolhido a priori e foi constante para todos os conjuntos de dados, isto foi desconsiderado.

Na figura 4 encontram-se as probabilidades empíricas e teóricas acumuladas e os percentis empíricos e teóricos para o conjunto completo das velocidades cúbicas do vento ajustadas pelas 3 distribuições consideradas. Verifica-se que as distribuições de Weibull e Log-Normal foram as que mais se aproximaram da reta 45°. Apesar da distribuição Log-Normal ter se ajustado melhor que a Beta, seu comportamento no extremo superior é pior, superestimando muito as observações. Este mesmo comportamento (ajuste precário na extremidade superior) também foi constatado no caso das velocidades do vento.

v	Weibull			Log-Normal			Beta (0-10)		
	χ^2	K-S	PP	χ^2	K-S	PP	χ^2	K-S	PP
jan	28	0,04	0,4	143	0,05	0,8	16	0,03	0,2
fev	43	0,04	0,4	76	0,06	0,9	23	0,03	0,2
mar	90	0,07	1,3	62	0,06	1,6	53	0,05	0,1
abr	84	0,07	1,2	72	0,05	0,3	56	0,05	0,7
mai	36	0,04	0,4	159	0,04	1,6	14	0,03	0,6
jun	54	0,04	0,5	56	0,04	0,4	18	0,03	0,2
jul	51	0,04	0,4	65	0,04	0,5	18	0,02	0,1
ago	33	0,03	0,3	106	0,04	0,7	17	0,02	0,1
set	15	0,02	0,1	90	0,06	1,0	6	0,01	0,1
out	87	0,03	0,9	25	0,05	0,3	10	0,02	0,1
nov	36	0,04	0,4	64	0,05	0,5	19	0,03	0,2
dez	78	0,09	1,4	98	0,06	0,7	41	0,05	0,6
ano	413	0,03	5,6	1561	0,04	6,0	147	0,03	2,7
SE	637	0,07	5,9	134	0,02	0,4	291	0,07	4,3

Tabela 1: Estatísticas de ajustamento das distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta às velocidades do vento nos 12 meses do ano e no ano todo, em todas as direções e na predominante (SE), em Panorama, SP.

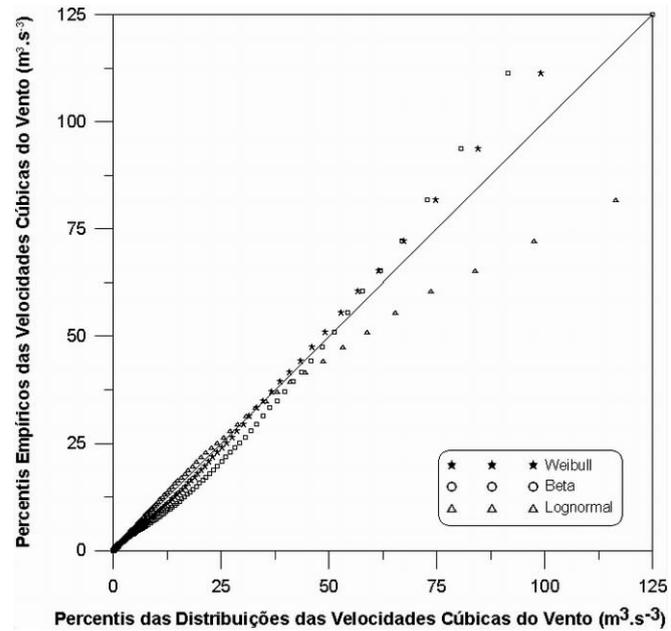
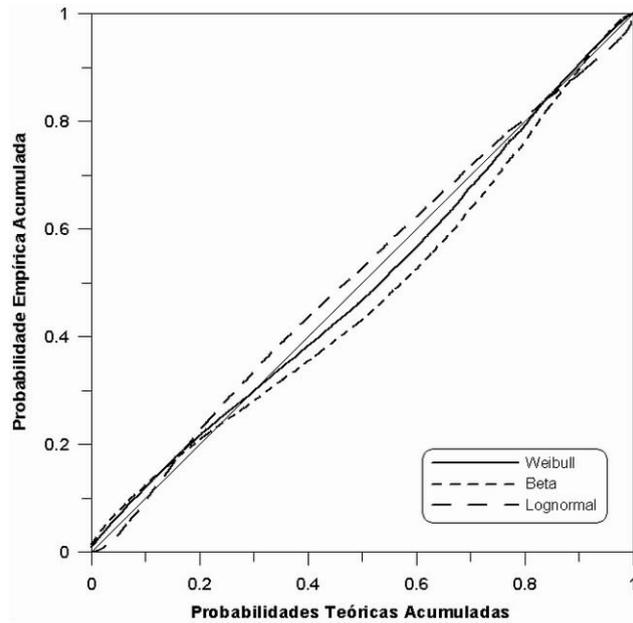


Figura 4: Probabilidades acumuladas (a) e percentis (b) para as velocidades cúbicas do vento ajustadas pelas distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta.

v ³ mês	Weibull			Log-Normal			Beta (0-1000)		
	χ ²	K-S	PP	χ ²	K-S	PP	χ ²	K-S	PP
jan	28	0,04	0,4	143	0,05	0,8	96	0,08	1,5
fev	43	0,04	0,4	76	0,06	0,9	104	0,08	1,2
mar	90	0,07	1,3	62	0,06	1,6	194	0,11	0,4
abr	84	0,07	1,2	72	0,05	0,3	144	0,10	2,5
mai	36	0,04	0,4	159	0,04	1,6	108	0,08	1,5
jun	45	0,04	0,5	56	0,04	0,4	77	0,06	1,1
jul	51	0,04	0,4	65	0,04	0,5	93	0,06	1,0
ago	33	0,03	0,3	106	0,04	0,7	83	0,06	1,0
set	15	0,02	0,1	90	0,06	1,0	53	0,05	0,6
out	87	0,03	0,9	25	0,05	0,3	90	0,07	1,2
nov	36	0,04	0,4	64	0,05	0,5	103	0,03	1,5
dez	78	0,09	1,4	98	0,06	0,7	152	0,10	2,4
ano	413	0,03	5,6	1561	0,04	6,0	1276	0,08	2,0
SE	637	0,07	5,9	182	0,02	0,4	1082	1,9	0,12

Tabela 2: Estatísticas de ajustamento das distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta às velocidades cúbicas do vento nos 12 meses do ano e no ano todo, em todas as direções e na predominante (SE), em Panorama, SP.

As estatísticas de ajustamento das 3 distribuições consideradas aos conjuntos mensais e anuais das velocidades cúbicas do vento encontram-se na tabela 2. Verifica-se que os melhores ajustes foram obtidos pelas distribuições de Weibull (janeiro, fevereiro, maio, julho, agosto, setembro, novembro e anual) e Log-Normal (março, abril, junho, outubro, dezembro e SE). A distribuição Beta não se ajustou bem em nenhum destes casos. Em alguns casos (março, junho e outubro), os 3 métodos de avaliação não tiveram um desempenho uniforme, indicando uma leve diferença na qualidade dos ajustes por estas duas distribuições.

Os parâmetros estimados para as 3 distribuições mensais e anuais das velocidades e velocidades cúbicas do vento encontram-se na tabela 3.

Os melhores ajustes para o conjunto completo das velocidades (distribuição Beta) e velocidades cúbicas (distribuição de Weibull) encontram-se na figura 5. A distribuição Beta apresentou um ajuste perfeito, em parte devido ao seu limite superior (10m/s). No caso da distribuição de Weibull, o ajuste foi precário no limite inferior, para as $v^3 < 1 \text{ m}^3/\text{s}^3$, e muito bom acima deste.

Este estudo mostra que nem sempre a distribuição de Weibull é a que melhor se ajusta às velocidades do vento. Outras distribuições, em particular a Beta podem prover um tão bom ou melhor ajuste. Além disso, enfatiza a importância

	v (m/s)			Weibull				Log-Normal				Beta [0,10]			
	v (m/s)			v		v ³		v		v ³		v		v ³	
	μ	σ ²	n	a	b	a	b	μ _v	σ _v	μ _v	σ _v	a	b	a	b
jan	2,0	1,1	1461	0,21	1,99	0,21	0,66	0,52	0,59	1,56	1,73	2,77	11,36	0,54	34,98
fev	1,9	0,9	1330	0,21	2,09	0,21	0,70	0,49	0,55	1,46	1,65	3,15	13,66	0,58	46,30
mar	1,8	0,9	1465	0,23	2,03	0,23	0,68	0,45	0,55	1,36	1,64	3,08	13,93	0,56	46,91
abr	2,0	1,0	1425	0,16	2,19	0,16	0,73	0,59	0,52	1,76	1,57	3,33	12,98	0,67	40,04
mai	2,3	1,3	1480	0,14	2,08	0,14	0,69	0,67	0,55	2,02	1,66	2,89	9,90	0,56	27,72
jun	2,0	0,8	1429	0,15	2,39	0,15	0,80	0,58	0,49	1,73	1,47	3,87	15,65	0,71	54,42
jul	2,1	0,9	1443	0,14	2,32	0,14	0,78	0,62	0,51	1,85	1,52	3,58	13,63	0,68	44,06
ago	2,4	1,2	1482	0,10	2,27	0,10	0,76	0,75	0,52	2,26	1,55	3,34	10,59	0,65	26,57
set	2,7	1,6	1437	0,07	2,31	0,07	0,77	0,89	0,52	2,65	1,57	3,19	8,46	0,66	18,15
out	2,1	1,2	1472	0,18	2,03	0,18	0,68	0,59	0,58	1,76	1,74	2,80	10,59	0,55	30,44
nov	2,1	1,2	1347	0,16	2,07	0,16	0,69	0,62	0,56	1,85	1,67	2,94	10,81	0,57	29,94
dez	2,0	1,2	1455	0,19	1,96	0,19	0,66	0,56	0,58	1,68	1,75	2,71	10,52	0,52	29,36
ano	2,1	1,1	17968	0,16	2,08	0,16	0,69	0,61	0,56	1,84	1,67	2,95	10,92	0,57	30,45
SE	2,2	1,3	4579	0,17	2,00	0,17	0,67	0,64	0,53	1,92	1,58	3,02	10,84	0,56	26,81

Tabela 3: Parâmetros das distribuições de Weibull, Log-Normal e Beta para as velocidades e velocidades cúbicas do vento em Panorama, SP.

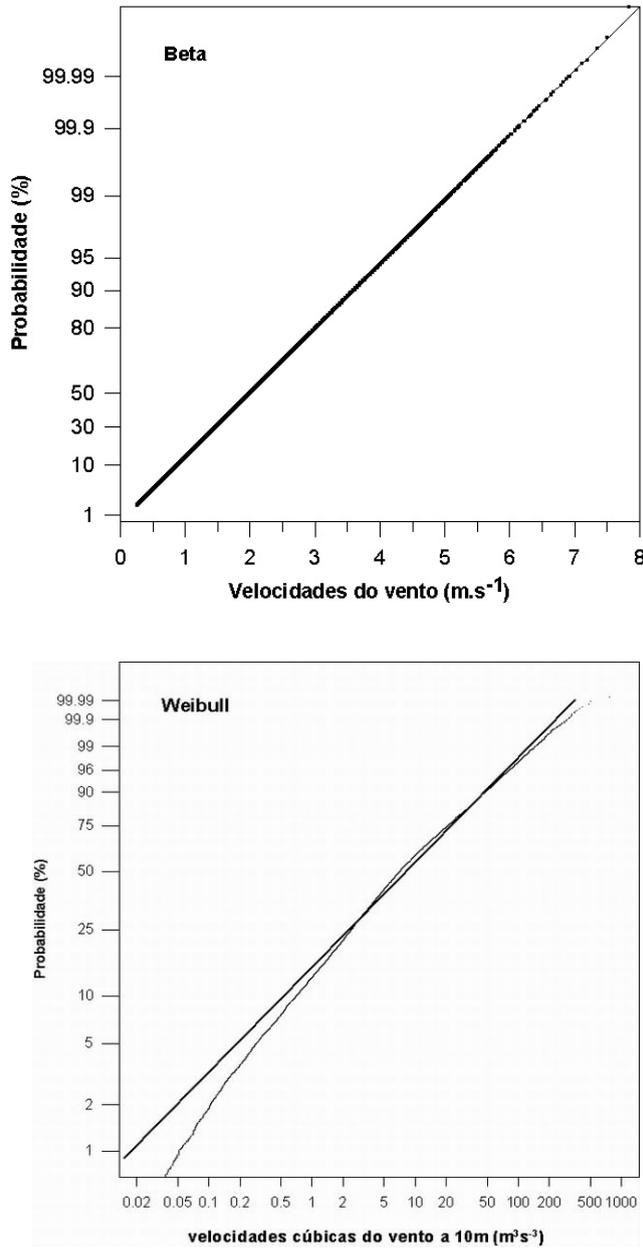


Figura 5: Velocidades do vento observadas e ajustadas pela distribuição Beta (a) e velocidades cúbicas observadas e ajustadas pela distribuição de Weibull (b).

de ajustes às velocidades cúbicas do vento, pois as v^3 somente serão Weibull ou Log-Normalmente distribuídas se proverem ajustes perfeitos às v . Como os critérios de verificação dos ajustes são relativos, devem incluir testes χ^2 , KS e gráficos P-P, pois nem sempre seus resultados são equivalentes. Mesmo as distribuições que levam aos melhores ajustes podem apresentar problemas nos extremos, importantes nas estimativas das velocidades de corte, logo devem ser examinadas usando gráficos Q-Q (percentis por exemplo).

Na tabela 4 encontram-se as densidades de potência mensais e anuais, estimadas pelas 3 distribuições consideradas. As estimativas baseadas nas distribuições de Weibull e Beta tiveram um comportamento similar, apesar da última não ter provido um bom ajuste. As estimativas de P baseadas na distribuição Log-Normal foram sistematicamente superiores (~40%) às feitas pelas distribuições de Weibull e Log-Normal.

As extrapolações de densidade de potência para outras alturas podem ser feitas, como mostrado anteriormente, por meio do perfil logarítmico do vento ou da lei de potência, mas normalmente serão sub-estimativas, pois referem-se a atmosfera neutra.

4. CONCLUSÕES

A estimativa do potencial eólico de uma região é um processo complexo que implica no ajuste e verificação de diferentes distribuições teóricas de probabilidade às velocidades e, preferencialmente, às velocidades cúbicas do vento.

A decisão sobre a melhor distribuição deve envolver testes de hipótese (χ^2 , KS) e gráficos P-P. Além disso, deve-se avaliar o comportamento das distribuições nos seus extremos (gráficos Q-Q).

A distribuição Beta foi a que melhor se ajustou à maioria dos conjuntos de velocidade do vento (13 dos 14 analisados).

As distribuições de Weibull e Log-Normal foram as que melhor se ajustaram aos conjuntos de velocidade cúbica do vento (8/14 no caso da Weibull e 6/14 no caso da Log-Normal).

As estimativas de potência do vento baseadas na distribuição Log-Normal foram sistematicamente superiores (~40%) às feitas pela distribuição de Weibull.

Densidades de Potência (W/m ²)														
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	ano	SE
Weibull	8.3	6.9	6.4	8.6	12.1	7.3	8.7	13.4	19.2	9.9	10.4	9.6	10.2	3.4
Log-Normal	12.2	9.7	8.6	11.5	17.1	9.5	11.6	18.2	27.8	15.1	14.7	14.2	14.5	4.1
Beta	8.7	7.2	6.8	8.8	12.8	7.4	8.8	13.8	20.1	10.2	10.7	10.1	10.6	3.5

Tabela 4: Densidades de potência estimadas pelas 3 distribuições consideradas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Archer, C. L. & Jacobson, M. Z. Spatial and Temporal Distributions of US Winds and Wind power at 80m derived from Measurements. **Journal of Geophysical Research**, v.108, n. D9, p. ACL 10-1 –10-20, 2003.

Garcia, A. ; Torres, J. L.; Prieto, E. ; & Francisco, A Fitting Wind Speed Distributions: A Case Study. **Solar Energy**, v. 6, n. 2, p. 139-144, 1998.

Gupta, B. K. Weibull Parameters for Annual and Monthly Wind Speed Distributions for Five Locations in India. **Solar Energy**, v. 37, n. 6, p. 469-471. 1986.

Henessey, J. P. Some Aspects of Wind Power Statistics. **Journal of Applied Meteorology**, v. 16, n. 2, p. 119-128, 1977.

Justus, C. G. & Mikhail, A. Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution. **Geophysical Research Letters**, v. 3, p. 261-264, 1976.

Justus, C. G.; Hargraves, W. R. ; Mikhail, A. & Graber, D. Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distributions. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, n. 3, p. 350-353, 1978.

Justus, C. J.; Mani, K. & Mikhail, A. Interannual and Month-to-Month Variations of Wind Speed. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, p. 913-920, 1979.

Luna, R. E. & Church, H. W. Estimation of Long-Term Concentrations Using a “Universal” Wind Speed Distribution. **Journal of Applied Meteorology**, v. 13, n. 8, p. 910-916, 1974.

Nfaqui, H.; Buret, J. & Sayigh, A. A. M. Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Marrocos. **Solar Energy**, v. 6, n. 1, p. 51-60, 1998.

Jones, B. **Matlab – Statistics Toolbox**. Natick, MA: MathWorks Inc., 1997, 244 p.

Peterson, E. W. On the Use of Power Laws for Estimates of Wind Power Potential. **Journal of Applied Meteorology**, v. 17, n. 3, p.390-394, 1978.

Reed, J. W. Wind Power Climatology. **Weatherwise**, v. 27, p. 237-242, 1974.

Rehman, S.; Halawani, T. O. & Hussain, T. Weibull Parameters for Wind Speed Distribution in Saudi Arabia. **Solar Energy**, v. 3, n.6, p. 473-479, 1994.

Silva, B. B.; Alves, J. J. & Cavalcanti, E. P. Caracterização do Potencial Eólico da Direção Predominante do Vento no Estado da Bahia. In : XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2002, Foz de Iguaçu, PR, **Anais ...** p.104-112.

Sucharov, E. C. ; Domingues, M. O. & Silva, A. L. M. O Modelo de Weibull para Distribuições de Velocidade do Vento no Estado do Rio de Janeiro. In : VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1990, Salvador, BA, **Anais ...**v. II, p. 583-587.

Van der Auwera, L.; Meyer, F & Malet, L. M. The Use of the Weibull 3-Parameters Model for Estimating Mean Wind Power Densities. **Journal of Applied Meteorology**, v. 19, n. 7, p. 819-825, 1980.