

SIMULADOR ESTOCÁSTICO BASEADO EM MODELOS PROBABILÍSTICOS, PARA GERAÇÃO DE SÉRIES HORÁRIAS DE VENTO

VIRGENS FILHO J.S.¹, LEITE M.L.², PINHEIRO A.A.³, BERUSKI G.C.⁴

¹ Matemático, Prof. Associado, Laboratório de Computação Científica/Departamento de Informática, Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG, Ponta Grossa - PR, Brasil. Fone: (0 xx 42) 3220-3097, jvirgens@globocom

² Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto - Departamento de Biologia Geral - UEPG, Ponta Grossa - PR, Brasil.

³ Acadêmico de Engenharia de Computação - UEPG, Ponta Grossa - PR, Brasil.

⁴ Acadêmico de Biologia - UEPG, Ponta Grossa - PR, Brasil.

Apresentado no XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 22 a 25 de setembro de 2009 – Minas Centro, Belo Horizonte – MG

RESUMO: Este trabalho objetivou o desenvolvimento de um simulador estocástico baseado em modelos probabilísticos, para geração de séries horárias de vento. Por meio de análise estatística utilizando o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) a ferramenta desenvolvida na linguagem C#, aponta dentre as distribuições Weibull, Rayleigh, Beta e Gama o melhor modelo para representar as séries horárias mensais, simulando posteriormente longas séries de dados de vento. A sua utilização permitirá efetuar estudos visando o aproveitamento do potencial eólico de uma localidade, contribuindo com o desenvolvimento sustentável regional, proporcionando a preservação do meio ambiente e a racionalização dos recursos naturais.

PALAVRAS-CHAVE: vento, simulação, estatística climatológica.

STOCHASTIC SIMULATOR BASED ON PROBABILISTIC MODELS, FOR GENERATION OF HOURLY SERIES OF WIND

ABSTRACT: This work aimed at the development of a stochastic simulator, based on probabilistic models, for generation of hourly wind series. Through statistical analysis using the Kolmogorov-Smirnov test, the tool developed in the language C #, points, among the distributions Weibull, Rayleigh, Beta and Gama, the best model to represent the monthly hourly series, simulating long series of wind data. It use will allow studies seeking for the use of the wind potential of a place, contributing with the regional maintainable development, providing the preservation of the environment and the rationalization of the natural resources.

KEY-WORDS: wind, simulation, climatological statistics.

INTRODUÇÃO: A energia eólica é a energia cinética das massas de ar em deslocamento, sendo proporcional ao cubo da velocidade do vento. Apesar de ter pequena participação na matriz energética, a sua utilização é amplamente conhecida, podendo ser destacada em atividades como o bombeamento de água para a irrigação, processamento, moagem e secagem de grãos. Todavia, nem todas as áreas apresentam condições favoráveis para o uso da energia eólica, uma vez que o dimensionamento e a escolha de tais sistemas requer, entretanto, o conhecimento do potencial eólico da região onde serão instalados. Encontram-se na literatura diferentes modelos probabilísticos propostos para ajustar os dados de distribuições empíricas de velocidade do vento, porém, dentre os mais usados por pesquisadores, pode-se citar as distribuições de Weibull, Rayleigh, Beta e Gama. Grande atenção tem sido dada para a distribuição de Weibull, cujo modelo apresenta um bom ajuste para os dados de velocidade dos ventos, como indicado em Hennessey (1977). Justus et al. (1978) aplicaram o modelo para mais de 100 estações nos Estados Unidos e concluíram que a distribuição de Weibull

proporcionou o melhor ajuste. Justificam que a mesma é mais fácil para trabalhar e mais geral do que a distribuição de Rayleigh. Por outro lado, diversos estudos têm demonstrado que os valores estimados de alguns fatores meteorológicos também podem ser adequadamente representados pela distribuição Beta (Falls, 1973; Souza et al., 1998; Marques Júnior et al., 1995). Da mesma forma, a distribuição Gama também tem sido bastante usada para descrever distribuições de velocidade do vento conforme observa Hennessey (1977). Diante disso, esse trabalho objetivou desenvolver uma ferramenta computacional para a simulação horária do vento, utilizando os modelos probabilísticos Weibull, Rayleigh, Beta e Gama.

MATERIAL E MÉTODOS: O trabalho foi realizado no Laboratório de Computação Científica pertencente ao Departamento de Informática da Universidade Estadual de Ponta Grossa, onde foram utilizados dados horários de vento para Ponta Grossa, referentes ao período de 1998 à 2006, obtidos junto à Estação Meteorológica Automática do SIMEPAR, situada no Parque Estadual de Vila Velha, com coordenadas geográficas de 25°13' de latitude Sul 50°01' de longitude Oeste e 880 metros de altitude, cujo sensor se encontra a 10 metros de altura. Para modelar mensalmente a distribuição de frequência das velocidades horárias do vento, foram utilizadas e implementadas computacionalmente as distribuições de probabilidade Weibull, Rayleigh, Beta e Gama, que frequentemente são aplicadas em estudos envolvendo dados de vento. A distribuição de Weibull para a velocidade do vento é expressa pela função de densidade de probabilidade:

$$f(v) = (k/c)(v/c)^{(k-1)} \exp[-(v/c)^k] \quad \text{Eq.1}$$

onde “c” é o fator de escala em unidades de velocidade do vento, “k” o fator de forma adimensional e “v” a variável aleatória velocidade do vento. A expressão matemática da função de densidade de probabilidade de Rayleigh é dada por:

$$f(v) = -\frac{v}{a^2} \exp\left(-\frac{v^2}{2a^2}\right) \quad \text{Eq.2}$$

onde,

$$a = \sqrt{\frac{2}{\pi}} E(v) \quad \text{Eq.3}$$

sendo que $E(v)$ é a esperança matemática da variável aleatória “v” (velocidade do vento). A função de densidade de probabilidade da distribuição Beta pode ser expressa de forma adimensionalizada para um intervalo compreendido entre “0” e “1”. A variável adimensionalizada v' toma então a seguinte forma:

$$f(v') = \frac{\Gamma(p+q)}{\Gamma(p)\Gamma(q)} (v')^{p-1} (1-v')^{q-1} \quad \text{Eq.4}$$

onde,

$0 \leq v' \leq 1$, para $p > 1$ e $q > 1$. A função de densidade de probabilidade Gama é expressa por:

$$f(v) = \frac{v^{\alpha-1} e^{-v/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad \text{Eq.5}$$

onde α é o parâmetro de forma e β o parâmetro de escala, estimados como em Virgens Filho (2001). A direção predominante do vento, representada pelos pontos cardeais e colaterais da rosa-dos-ventos, foi descrita probabilisticamente através da frequência relativa simples (fr_d) para cada hora de cada mês do ano no período considerado, cuja estimativa é dada por:

$$fr_d = f_d / (n+1) \quad \text{Eq.6}$$

onde f_d é a frequência absoluta de cada direção, n é o número de observações para cada hora dentro do mês analisado. Para determinar o melhor modelo probabilístico ajustado aos dados observados, foi implementado computacionalmente o teste Kolmogorov-Smirnov (K-S) para

uma amostra a 5% de probabilidade, que segundo Costa Neto (1977), é o mais adequado para testar diferenças entre distribuições de frequências empíricas e distribuições de frequência teóricas. A simulação de dados horários de vento foi efetuada por um algoritmo computacional que foi codificado na linguagem de programação C#. Além de ter como saída um arquivo no formato texto com os dados gerados, o simulador realiza estatísticas relacionadas aos parâmetros para a simulação bem como estatísticas mostrando o desempenho dos modelos probabilísticos, por meio de tabelas e gráficos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A Figura 1 apresenta a interface inicial da ferramenta denominada VENTHOR, onde se ilustra a aplicação da energia eólica. Na Figura 2 é apresentado o formulário onde é mostrada a análise e a conseqüente modelagem dos dados horários de vento onde é apresentada a distribuição de frequência empírica, bem como a aplicação do teste K-S, apontando o melhor modelo para os dados de cada hora dentro de cada mês. O gráfico da Figura 3 complementa com uma análise visual os resultados encontrados pelo teste K-S onde, para este exemplo, o melhor modelo ajustado foi o da distribuição Beta. Na Figura 4 pode ser visualizado os dados simulados, os quais podem ser exportados para um arquivo do tipo texto.



Figura 1 – Interface inicial da ferramenta VENTHOR.

The image shows a window titled 'Tabela de Frequência' with a subtitle 'Frequência e Ajuste de Distribuições'. It contains a large table with columns for various statistical parameters and distribution types. Below the table are several control panels for data classification, K-S test, and directional adjustment.

Frequência e Ajuste de Distribuições														Ajuste para a Dist. Beta			
Li	Ls	mi	fi	pi	Pi	Gama	Dgama	Rayleigh	Drayf	Beta	Dbeta	Weibull	Dweibull	Li	Ls	mi	fi
-0,5	0,7	0,1	17	0,0563	0,0563	0,0617	0,0054	0,0315	0,0248	0,0687	0,0223	0,0593	0,003	-0,06	0,05	0	14
0,7	1,9	1,3	76	0,2517	0,3079	0,2981	0,0098	0,2099	0,098	0,2666	0,0017	0,272	0,0359	0,05	0,16	0,11	66
1,9	3,1	2,5	63	0,2086	0,5166	0,5328	0,0163	0,4659	0,0507	0,4628	0,0074	0,5095	0,0071	0,16	0,28	0,22	62
3,1	4,3	3,7	46	0,1523	0,6889	0,7085	0,0396	0,7008	0,0319	0,635	0,0025	0,7055	0,0366	0,28	0,39	0,33	49
4,3	5,5	4,9	46	0,1523	0,8212	0,8254	0,0042	0,8611	0,0399	0,7746	0,0201	0,8404	0,0192	0,39	0,5	0,44	49
5,5	6,7	6,1	27	0,0894	0,9106	0,8983	0,0123	0,9466	0,036	0,8788	0,0013	0,9213	0,0107	0,5	0,61	0,56	25
6,7	7,9	7,3	16	0,053	0,9636	0,942	0,0216	0,983	0,0194	0,9481	0,0077	0,9644	0,0008	0,61	0,72	0,67	19
7,9	9,1	8,5	8	0,0285	0,9901	0,9674	0,0226	0,9955	0,0054	0,9861	0,0126	0,9852	0,0049	0,72	0,84	0,78	10
9,1	10,3	9,7	2	0,0066	0,9967	0,9819	0,0147	0,999	0,0023	0,9993	0,0092	0,9943	0,0024	0,84	0,95	0,89	5
10,3	11,5	10,9	0	0	0,9967	0,9901	0,0066	0,9998	0,0031	1	0,0033	0,998	0,0013	0,95	1,06	1	2

Classificação dos Dados:
 rc: 301 fu: 1,2
 Maior: 10,3 Média: 3,5
 Menor: 0,1 LitClc: -0,5
 H: 10,2 DP: 2,2

Teste K-S:
 D gama: 0,0396 D 1x: 0,0784
 D beta: 0,0223 D 1x: 0,054
 D weibull: 0,0366
 D Rayleigh: 0,098

Ajuste de Direção Predominante:

Direção	Li	Ls	mi	fi	pi
N	337,5	22,5	0	33	0,1096
NE	22,5	67,5	45	63	0,2093
E	67,5	112,5	90	51	0,1694
SE	112,5	157,5	135	86	0,2857
S	157,5	202,5	180	41	0,1362
SW	202,5	247,5	225	7	0,0233
W	247,5	292,5	270	11	0,0365
NW	292,5	337,5	315	9	0,0299

Parâmetros das Distribuições:

DistGama	DistBeta	DistWeibull	DistRayleigh
alfa: 2,013	p: 1,2716	a: 1,6506	Média: 3,4691
beta: 1,7234	q: 2,5783	b: 3,8074	

Buttons: Visualizar os Dados, Gráfico das Distribuições, Teste de Distribuições

Figura 2 – Formulário com a análise e modelagem probabilística do dados horários de vento.

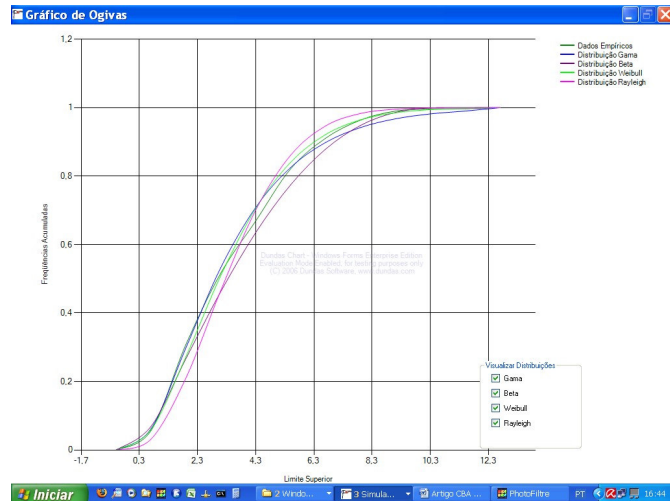


Figura 3 – Gráfico com a análise visual mostrando o resultado do teste K-S.

Data	Hora	Velocidade	Direção	Sentido
1/1/2009	0	4,3	148	SE
2/1/2009	0	0,9	299	NW
3/1/2009	0	6,5	123	SE
4/1/2009	0	5,5	7	N
5/1/2009	0	2,4	135	SE
6/1/2009	0	4,7	181	S
7/1/2009	0	1,6	188	S
8/1/2009	0	4,4	148	SE
9/1/2009	0	2,6	145	SE

Exportar dados...

Figura 4 – Dados horários de vento simulados.

Na Figura 5 é apresentado um formulário onde se verifica a validação da simulação, também para cada hora e mês, sendo que o teste K-S para duas amostras independentes foi utilizado para a análise estatística. O gráfico da Figura 6 complementa visualmente a concordância entre os dados simulados e observados.

Frequência e Ajuste de Distribuições									
Li	Ls	mi	fi	pi	Pi	fIS	piS	PIS	D e-s
0,5	0,7	0,1	17	0,0565	0,0565	23	0,0742	0,0742	0,0177
0,7	1,9	1,3	76	0,2525	0,309	74	0,2387	0,3129	0,0039
1,9	3,1	2,5	63	0,2093	0,5183	61	0,1968	0,5087	0,0086
3,1	4,3	3,7	46	0,1528	0,6711	55	0,1774	0,6871	0,016
4,3	5,5	4,9	46	0,1528	0,8239	43	0,1387	0,8258	0,0019
5,5	6,7	6,1	27	0,0897	0,9136	28	0,0903	0,9161	0,0025
6,7	7,9	7,3	16	0,0532	0,9668	16	0,0516	0,9677	0,001
7,9	9,1	8,5	8	0,0266	0,9934	9	0,029	0,9968	0,0034
9,1	10,3	9,7	2	0,0066	1	1	0,0032	1	0
10,3	11,5	10,9	0	0	1	0	0	1	0

Ajuste de Direção Predominante									
Direção	Li	Ls	fi	pi	Pi	fIS	piS	PIS	D e-s
N	337,5	22,5	33	0,1096	0,1096	29	0,0935	0,0935	0,0161
NE	22,5	67,5	63	0,2093	0,3189	60	0,1935	0,2871	0,0318
E	67,5	112,5	51	0,1694	0,4884	51	0,1645	0,4516	0,0368
SE	112,5	157,5	86	0,2857	0,7741	99	0,3194	0,771	0,0031
S	157,5	202,5	41	0,1362	0,9103	44	0,1419	0,9129	0,0026
SW	202,5	247,5	7	0,0233	0,9336	7	0,0226	0,9355	0,0019
W	247,5	292,5	11	0,0365	0,9701	10	0,0323	0,9677	0,0024
NW	292,5	337,5	9	0,0299	1	10	0,0323	1	0

Classificação dos Dados Empíricos			
nr:	301	h:	1,2
Maior:	10,3	Média:	3,5
Menor:	0,1	Li a Cl:	-0,5
H:	10,2	DP:	2,2

Classificação dos Dados Simulados			
nr:	310	Média:	3,4
Maior:	9,3	DP:	2,1
Menor:	0,1	n(val):	310
H:	9,2		

Teste K-S - Veloc.		Teste K-S - Dir	
D e-s:	0,0177	D e-s:	0,0367
D s-x:	0,1101	D s-x:	0,1101
D t-x:	0,1319	D t-x:	0,1319

Visualizar os Dados Empíricos Visualizar os Dados Simulados

Visualizar Gráfico do Teste K-S

Figura 5 – Tabela com a validação da simulação.

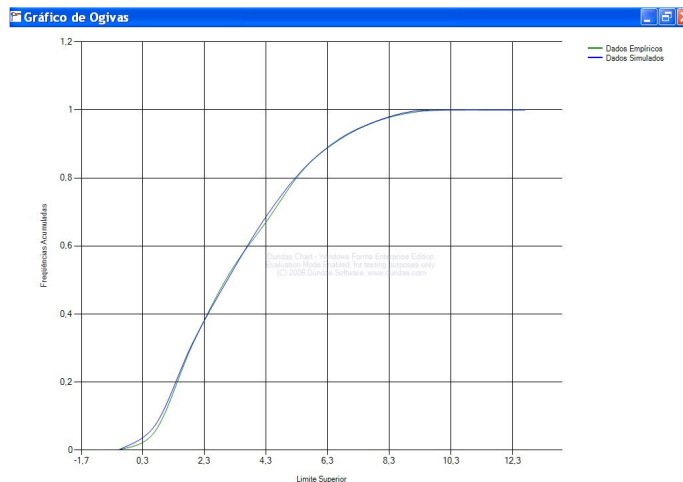


Figura 5 – Gráfico com análise visual mostrando a validação da simulação.

CONCLUSÕES: A ferramenta computacional VENTHOR se mostrou uma alternativa importante na análise, modelagem e simulação de dados horários de vento. Com o seu auxílio será permitido efetuar estudos visando o aproveitamento do potencial eólico de uma localidade, que por sua vez contribuirá para o desenvolvimento sustentável regional e consequentemente com a racionalização dos recursos naturais na preservação do meio ambiente.

AGRADECIMENTOS: Os autores agradecem a Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná pelo financiamento desta pesquisa e o Instituto Agrônomo do Paraná-IAPAR pela cessão dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- COSTA NETO, P. L. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 264p.
- FALLS, L. W. The beta distribution: a statistical model for world cloud cover. Alabama, NASA, 1973, p.1-6. (**NASA Technical Memorandum, TMX- 64714**).
- HENESSEY, J. P. P. Some aspects of wind power statistics. **J. Appl. Meteor.**, v.16, n. 2, p.119-128, 1977.
- JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W.R.; MIKHAIL, A.; GRABER, D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. **J. Appl. Meteor.**, v.17, n.3, p. 350-353, 1978.
- MARQUES JÚNIOR, S.; VALADÃO, L. T.; VIEIRA, A. R. R.; MOURA, M. V. T. Análise de dados de vento para a região de Botucatu - SP utilizando a distribuição beta. **Rev. Bras. Agrometeorol.**, Santa Maria, v.3, p.129-132, 1995.
- SOUZA, A. de; SOLER, L. S.; FERNANDEZ, W. A. Probabilidade da velocidade média mensal do vento no Passo do Lontra/ Pantanal Sul Mato-Grossense, Brasil: um estudo preliminar. **Rev. Bras. Agrometeorol.**, Santa Maria, v.6, n.2, p.235-238, 1998.
- VIRGENS FILHO, J.S. **Ferramenta computacional para simulação de séries climáticas diárias, baseada na parametrização dinâmica das distribuições de probabilidade**. Botucatu, 2001. 92p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrômicas, Universidade Estadual Paulista.