

CARACTERIZAÇÃO DE POTENCIAL EÓLICO: ESTUDO DE CASO PARA MARACANAÚ (CE), PETROLINA (PE) E PARNAÍBA (PI)

Tatiane Carolyne Carneiro – tatianecarolyne@oi.com.br
Paulo Cesar Marques de Carvalho – carvalho@dee.ufc.br
Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. Nos últimos anos a energia eólica tem se tornando cada vez mais competitiva no cenário mundial, fazendo com que sua participação na matriz elétrica apresente uma forte expectativa de crescimento. O presente artigo apresenta uma avaliação estatística para caracterização do potencial eólico para os municípios de Maracanaú-CE, Petrolina-PE e Parnaíba-PI. A modelagem estatística permite entender o comportamento futuro do processo estocástico associado à velocidade do vento, de suma importância para estimação da eletricidade a ser gerada e do fator de capacidade de turbinas eólicas, avaliação de potencial eólico de regiões de interesse e dos impactos associados a operação dos sistemas elétricos. Essa análise estatística das séries de velocidade de vento é realizada visando detectar padrões de sazonalidade e comportamentos que possam auxiliar na descrição do processo estocástico que se pretende modelar. Os padrões médios com melhores velocidades do vento ocorreram em Parnaíba (10 e 11m/s – melhor mês do ano) seguido de Petrolina (8 e 9 m/s – melhor mês do ano). A regularidade da velocidade do vento torna estes municípios regiões favoráveis para o aproveitamento da fonte eólica.

Palavras-chave: Energia eólica, Séries de velocidade do vento, Análise estatística.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e o aumento no nível tecnológico nos últimos anos vêm gerando a necessidade de elevar significativamente a oferta de energia elétrica para o atendimento a estas crescentes demandas, tanto em termos de qualidade como de quantidade. Tornam-se necessárias matrizes elétricas bem planejadas e diversificadas, capazes de manter o suprimento energético confiável.

Nos últimos anos, a geração eolielétrica tem tido uma rápida inserção no sistema elétrico brasileiro, totalizando 119 usinas eólicas instaladas, com uma capacidade de geração de 2.788 MW (Abeolica, 2013), compreendendo aproximadamente 2,6% da capacidade total brasileira, principalmente na Região Nordeste. Contudo, a potência produzida pelos parques eólicos está diretamente relacionada à intermitência do vento. Nesse contexto, existe uma incerteza associada, que pode ser reduzida com o uso de técnicas para caracterização de séries históricas de velocidade do vento nos locais em análise e com a aplicação de metodologias de previsão, que venham a contribuir para uma maior segurança na operação futura dos sistemas elétricos.

A matriz elétrica brasileira para geração de eletricidade é predominantemente feita por meio de fonte renovável de energia, hidroeletricidade, complementada por termoelétricas em períodos em que os reservatórios hídricos estejam com baixos níveis. Esse tipo de sistema é conhecido como “hidrotérmico”; é nesse contexto, que é possível entender a necessidade de recursos complementares na matriz energética, capazes de substituir as térmicas, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa e os custos com combustíveis em períodos de reduzidos índices pluviométricos.

Nesse contexto complementar, destaca-se a energia eólica, originada da transformação da energia cinética contida nos movimentos de massas de ar em energia mecânica pelo giro de pás e depois em energia elétrica por meio de geradores. Os movimentos de massas de ar são conhecidos como vento, e estes sofrem influência da associação entre a energia solar e a rotação da terra, variando entre as regiões, a depender da localização no globo terrestre (Carvalho, 2003). A energia eólica traz consigo uma incerteza relacionada à produção final, pois o vento tem características intermitentes, que muitas vezes limitam sua aplicação.

Diante do comportamento variável das séries históricas de velocidade do vento é importante se aplicar análises estatísticas, capazes de detectar tendências e identificar padrões de sazonalidade. A modelagem estatística permite entender o comportamento futuro do processo estocástico associado à velocidade do vento, de suma importância para estimação da eletricidade gerada e do fator de capacidade de turbinas eólicas, avaliação do potencial eólico em locais de interesse e dos impactos na operação do sistema elétrico (Maceira, et al., 2011). Feita a análise dos dados com o auxílio das ferramentas estatísticas, é possível a utilização de técnicas para a previsão de séries de velocidade do vento para as regiões de interesse.

O objetivo do presente artigo é utilizar ferramentas da estatística para caracterizar o potencial eólico de três municípios localizados no Nordeste Brasileiro.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

O presente artigo utiliza de técnicas estatísticas para caracterizar o potencial eólico em três municípios do Nordeste Brasileiro. Para a realização deste estudo, foram utilizados dados medidos a cada 10 minutos, obtidos por meio de três estações anemométricas localizadas nos municípios: a) Maracanaú – CE; b) Parnaíba – PI e; c) Petrolina – PE, localizados na Fig. 1.

O município de Maracanaú está localizado no Ceará, a 18 km de Fortaleza, considerado o maior centro industrial do estado. Parnaíba está localizada no Delta do rio Parnaíba, localizado na planície litorânea do Piauí, com topografia regular, favorecendo o regime de ventos na região. Já o município de Petrolina difere dos outros dois por estar localizado distante do litoral, no interior de Pernambuco, na mesorregião do Rio São Francisco (IBGE, 2013).

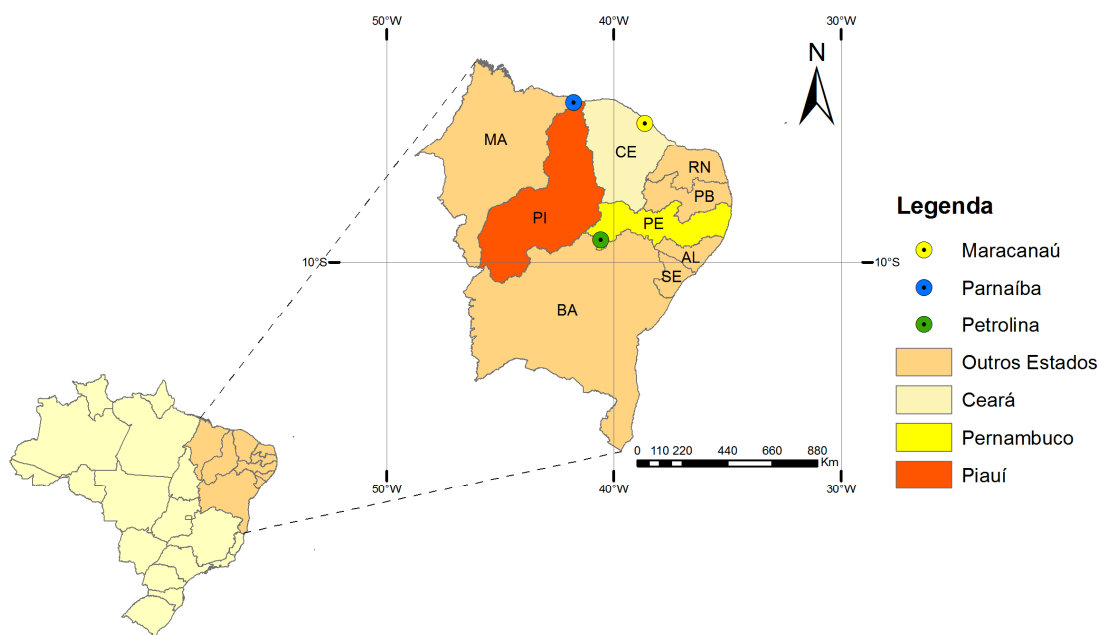


Figura 1 - Localização dos municípios onde estão localizadas as torres anemométricas.

2.2 Aquisição de dados

As estações anemométricas foram financiadas pelo Projeto “**Previsão de potencial eólico visando operação integrada ótima de unidades geradoras de eletricidade: estudo de caso para o Nordeste do Brasil**”, financiado pelo CNPq. Os dados compreendem os períodos de fevereiro de 2012 até janeiro de 2013 (Maracanaú), agosto de 2012 até julho de 2013 (Parnaíba) e maio de 2012 até março de 2013 (Petrolina).

As estações anemométricas foram instrumentadas com um conjunto de medição, constituído de três anemômetros, da marca NRG 40c, instalados a 78, 50 e 20 m de altura; equipamento NRG 500P para medição de direção do vento, instalado a 78 m; sensor de temperatura, da marca NRG 110S e piranômetro da marca NRG LI – 200SA, instalado a 14 m. Sistema de aquisição Data Logger NRG Symphonie-plus, com faixa de medição entre 0 e 96 m/s, permite o armazenamento de dados de velocidade média, para intervalos de 10 min. Essas médias são calculadas a partir de dados processados a cada 2 s. A Tab. 1 possui informações sobre as estações anemométricas.

Uma vez obtidos os dados no formato NRG, os mesmos foram convertidos e analisados com o objetivo de descrever o comportamento estocástico das séries de velocidade do vento e identificar padrões e sazonalidades, por meio da análise das séries de vento (histogramas, dias característicos, parâmetros estatísticos das séries) e a avaliação das estatísticas das séries por meio do ajuste dos dados, por meses, usando a distribuição de Weibull.

Tabela 1 - Informações referentes às torres anemométricas.

NÚMERO	LOCALIZAÇÃO/ESTAÇÃO	PERÍODO ANALISADO	ALTURA (m)	ALTURAS (m) - ANEMÔMETROS
0001	Maracanaú/Fazenda Raposa – Universidade Federal do Ceará	Fev/2012 até Jan/2013	80	78, 50 e 20
0002	Petrolina/Instituto Federal do Sertão Pernambucano	Mai/2012 até Mar/2013		
0003	Parnaíba/ Instituto Federal de	Ago/2012 até		

3 ESTUDO DAS SÉRIES TEMPORAIS DE VELOCIDADE DO VENTO

Estudar séries temporais é sumarizar as propriedades características das séries e caracterizá-las quanto ao seu comportamento. Para o presente estudo foi utilizada a parte da estatística descritiva, onde são utilizadas técnicas para descrever e sumarizar o conjunto de dados avaliados, tais como gráficos temporais, histogramas e tabelas com estatísticas das séries (Malta, 2009).

3.1. Comportamento anual

Como mencionado, a base de dados é composta por três séries de velocidade de vento coletados em três localidades do Nordeste do Brasil: Maracanaú-CE, Parnaíba-PI e Petrolina-PE. As medições foram realizadas com intervalos de dez minutos. As duas primeiras séries possuem dados por um período de um ano, a última é composta por dados observados em onze meses.

As Figs. 2,4 e 6 reproduzem, usando as médias diárias, o comportamento anual da velocidade do vento nas três localidades. Em seguida a cada gráfico temporal, são mostrados os respectivos histogramas nas Figs. 3, 5 e 7.

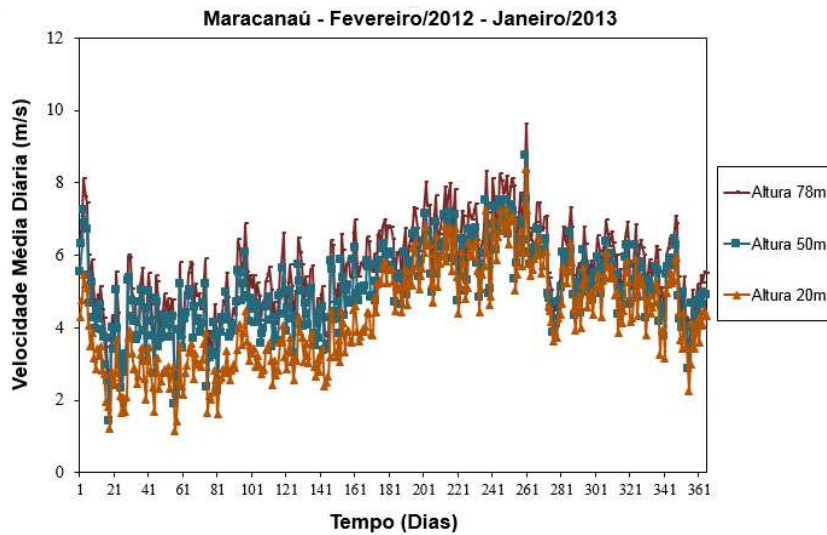


Figura 2 - Série de vento de Maracanaú Fev/2012 – Jan/2013.

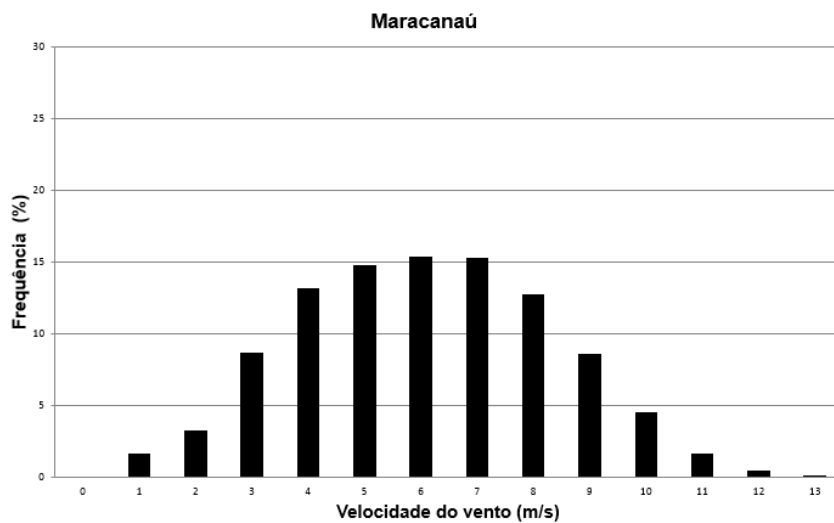


Figura 3 - Histograma de Maracanaú Fev/2012 – Jan/2013.

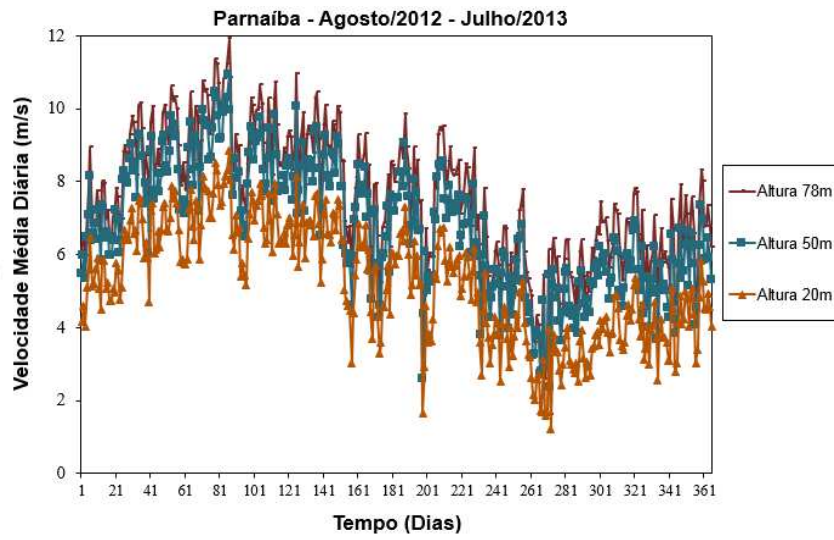


Figura 4 - Série de vento de Parnaíba Ago/2012 – Jul/2013.

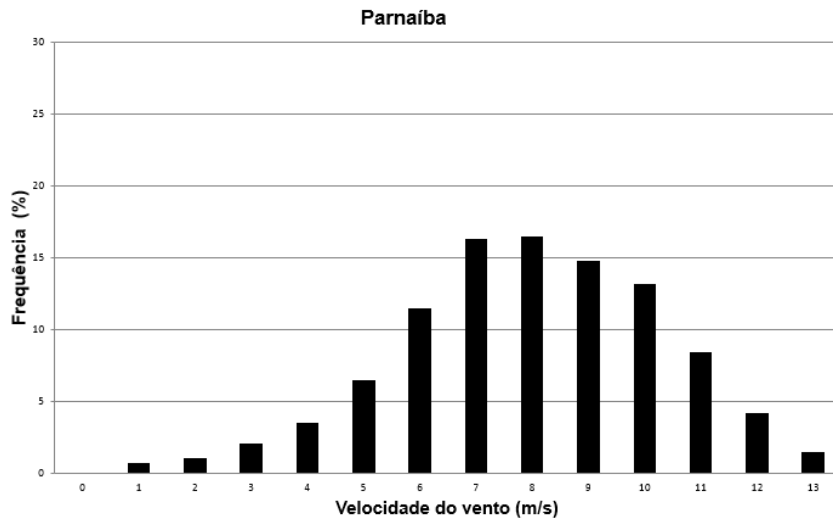


Figura 5 - Histograma de Parnaíba Ago/2012 – Jul/2013.

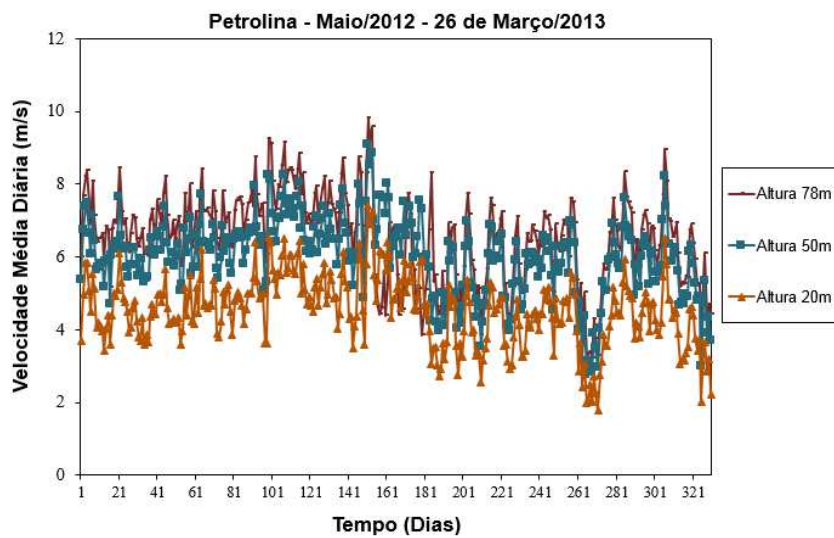


Figura 6 - Série de vento de Petrolina Mai/2012 – Mar/2013.

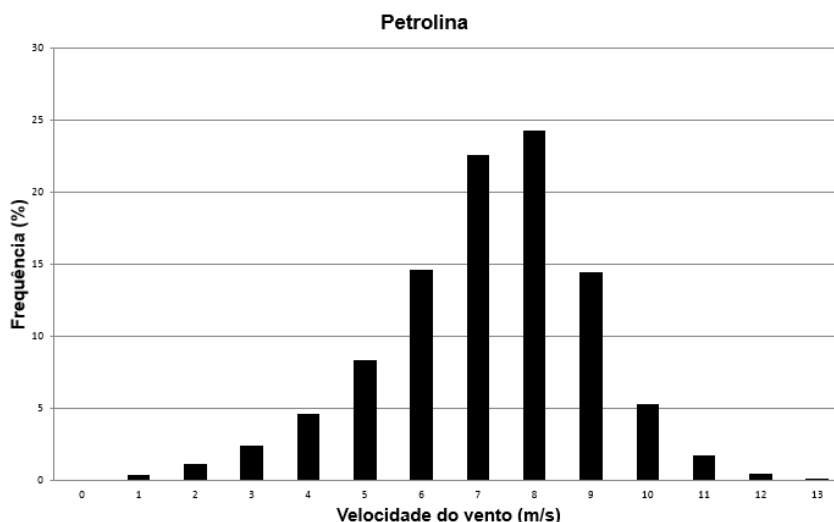


Figura 7 - Histograma de Petrolina Mai/2012 – Mar/2013.

Analisando os gráficos, percebe-se que em Maracanaú as maiores médias de velocidade são observadas entre os meses de agosto e outubro; em Parnaíba as melhores médias são observadas entre os meses de setembro e dezembro. Destaque para as duas localidades é o mês de outubro. Em Petrolina, as melhores médias de velocidade de vento são observadas entre os meses de julho e outubro, com destaque para o mês de agosto; o restante do período analisado a velocidade do vento permanece com amplitudes entre 4 e 8 m/s. Os dados demonstram que nas três localidades existe uma sazonalidade bem definida, com maiores velocidades do vento em torno do período de menores índices pluviométricos, que no Nordeste brasileiro está definido, na maioria dos anos, entre os meses de julho e outubro.

Observando os histogramas, destaque com as melhores ocorrências anuais para Parnaíba, onde a maior parte das velocidades médias acima de 7 m/s. Em seguida, Petrolina com maiores ocorrências durante os 11 meses analisados entre 7 e 8 m/s. Maracanaú tem suas maiores médias entre 5 e 7 m/s.

Uma visão mais detalhada do comportamento das séries pode ser obtida por meio das estatísticas das séries. A Tab. 2 resume esses parâmetros estatísticos, os quais identificam o comportamento da velocidade do vento em cada localidade.

Tabela 2 - Dados estatísticos das séries de velocidade do vento (m/s).

Dados de velocidade do vento	MARACANAÚ	PARNAÍBA	PETROLINA
Mínimo	0,40	0,40	0,40
Máximo	14,80	16,80	14,30
Média	5,63	7,55	6,71
Mediana	5,60	7,60	6,90
Desvio Padrão	2,26	2,36	1,81
Variância	5,10	5,55	3,19
Número de Medições	52686,00	52302,00	47424,00

Os valores encontrados com base nas análises estatísticas de média demonstram que Parnaíba e Petrolina possuem as melhores condições para o aproveitamento eólico, com médias acima de 7 m/s e 6 m/s, respectivamente. Maracanaú apresentou média de 5,63 m/s, apresentando um potencial inferior às outras regiões analisadas. Velocidades médias anuais a partir de 6,0 m/s já configuram condições favoráveis para a implantação e operação de usinas eólicas (Maceira et al., 2011).

3.2. Distribuição de Weibull

Conforme verificado na literatura, a função de distribuição de Weibull é a mais utilizada na descrição do comportamento dos valores da velocidade do vento em uma dada localidade (Maceira et al., 2011). As Figs. 8, 9 e 10 resumem os histogramas dos meses com melhores e piores médias de velocidade do vento de Maracanaú, Parnaíba e Petrolina ajustados à distribuição de Weibull para os dados do anemômetro localizado a 78 m de altura. O cálculo dos valores de frequência de Weibull e dos parâmetros de forma e escala foi realizado utilizando o método empírico, como mostram as Eqs.(1), (2) e (3) (Rocha et al., 2012).

$$f_{Weibull}(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_m}\right)^{-1,086} \quad (2)$$

$$v_m = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

Onde v_m é a velocidade média em m/s, k e c são os parâmetros de forma e escala da distribuição de Weibull, respectivamente.

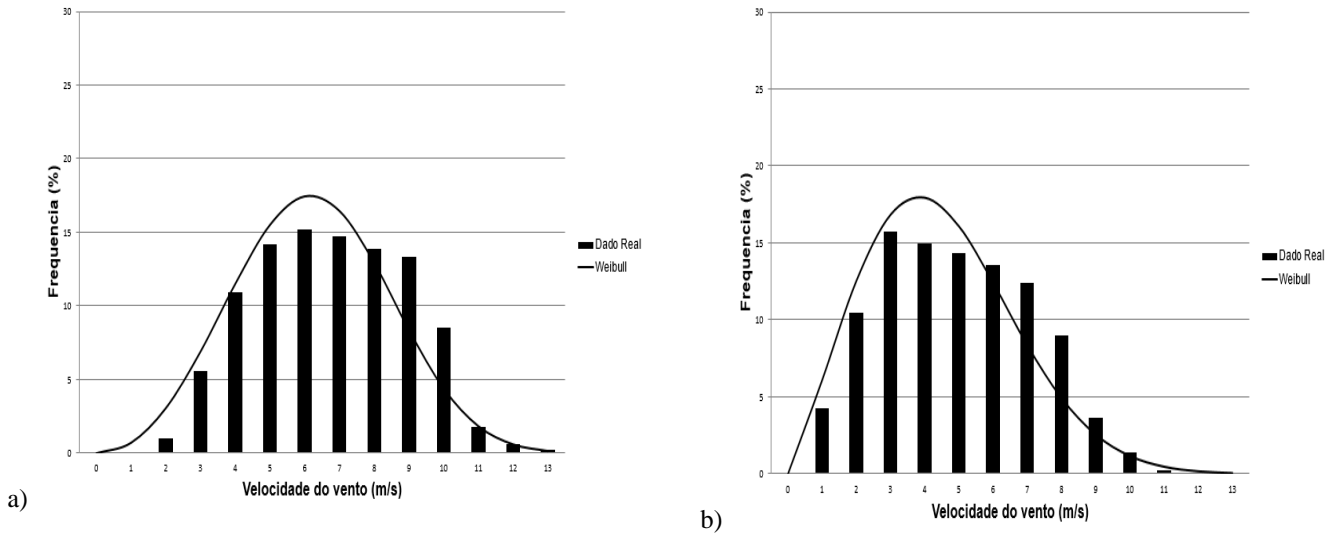


Figura 8 - a) Distribuição de Weibull Maracanaú – Out/2012 e b) Distribuição de Weibull Maracanaú – Mar/2012.

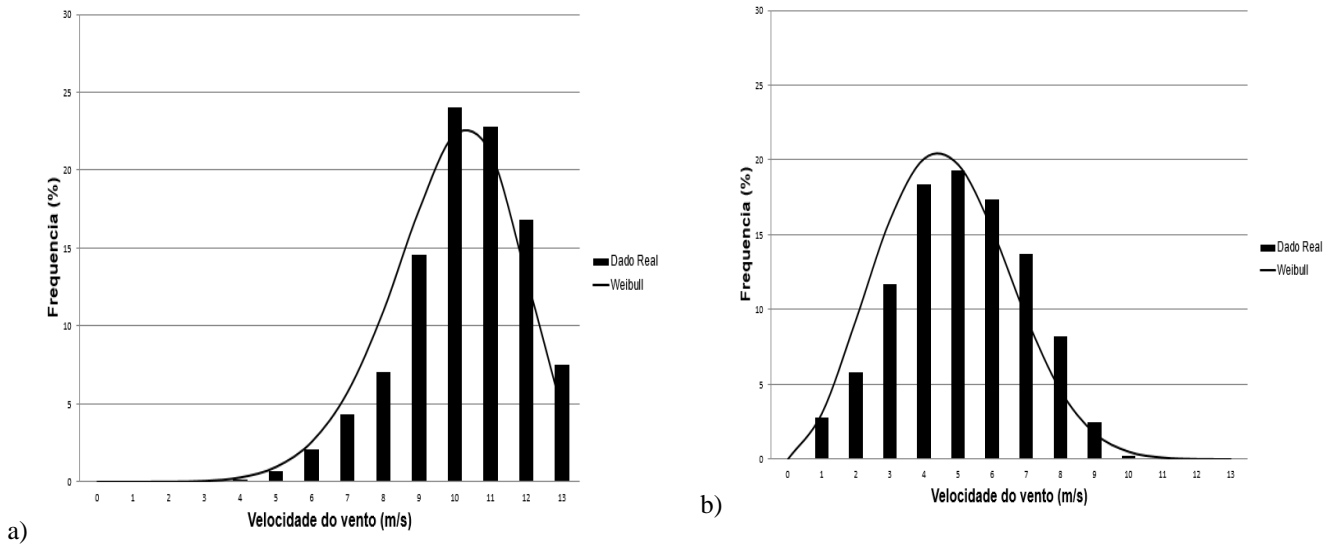


Figura 9 - a) Distribuição de Weibull Parnaíba – Out/2012 e b) Distribuição de Weibull Parnaíba – Abr/2012.

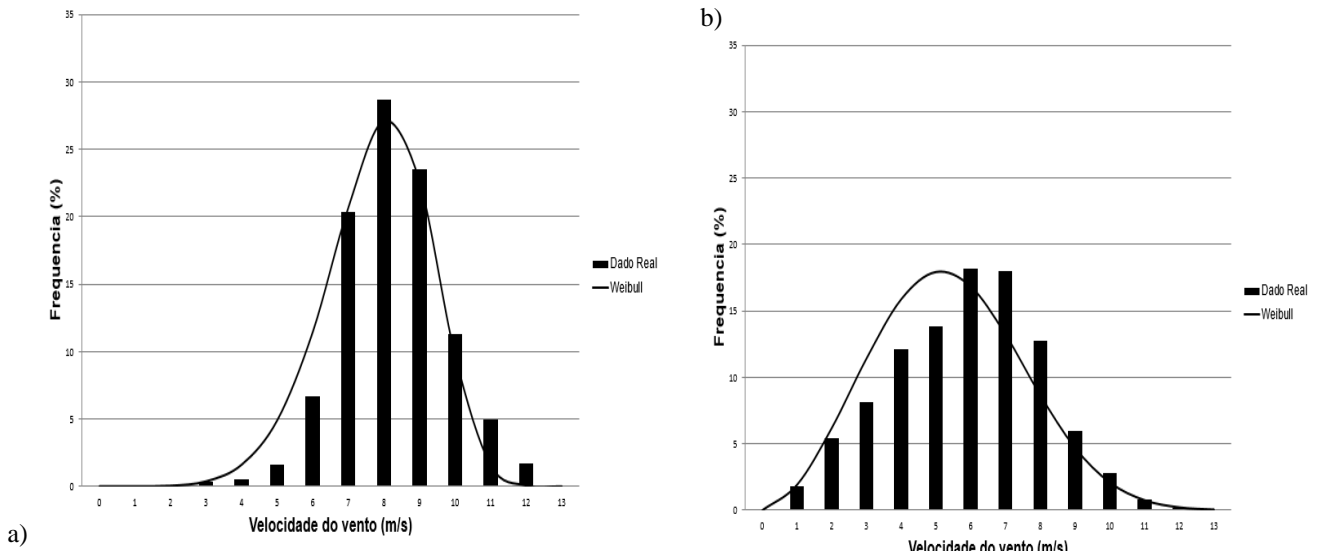


Figura 10 - a) Distribuição de Weibull Petrolina – Ago/2012 e b) Distribuição de Weibull Parnaíba – Jan/2012.

Pode-se observar na Fig. 8a, que representa o mês de outubro em Maracanaú, que as maiores ocorrências de velocidades estão entre 6 e 9 m/s, com um fator de forma de 4,06, dados com pouca concentração em um valor específico. Na Fig. 8b, do mês de março, que representa as menores médias de velocidade do local, pode-se observar que as velocidades de maior ocorrência estão entre 3 e 6 m/s, com um fator de forma de 2,08.

Em Parnaíba, o mês de maior média de velocidade do vento é outubro, representado na Fig. 9a, onde observa-se uma maior concentração de ocorrência de velocidades entre 10 e 11 m/s, com fator de forma de 6,49. Já no mês de menor média de velocidade do vento, abril, mostrado na Fig. 9b, pode-se observar que as maiores ocorrências de velocidades do vento estão entre 4 e 6 m/s, com fator de forma de 2,66.

Para Petrolina, no mês de maior potencial eólico, agosto, como mostra a Fig. 10a, observa-se que as maiores ocorrências de velocidades do vento estão entre 8 e 9 m/s, com fator de forma de 6,12. No mês de Janeiro, como mostra a Fig. 10b, as maiores ocorrências estão entre 6 e 7 m/s, com fator de forma de 2,74.

Para o cálculo da distribuição de Weibull, são calculados os parâmetros de forma (k) e escala (c). O comportamento de k é mostrado nas Figs. 11, 12 e 13 para todo o ano e em cada localidade. O parâmetro k é inversamente proporcional às oscilações na velocidade do vento; quanto maior esse parâmetro, menor a intensidade de turbulência e o desvio padrão e mais concentrado é o gráfico da distribuição de frequência. O fator k é importante por mostrar a regularidade dos ventos na localidade (Dalmaz, 2007; Carvalho, 2003).

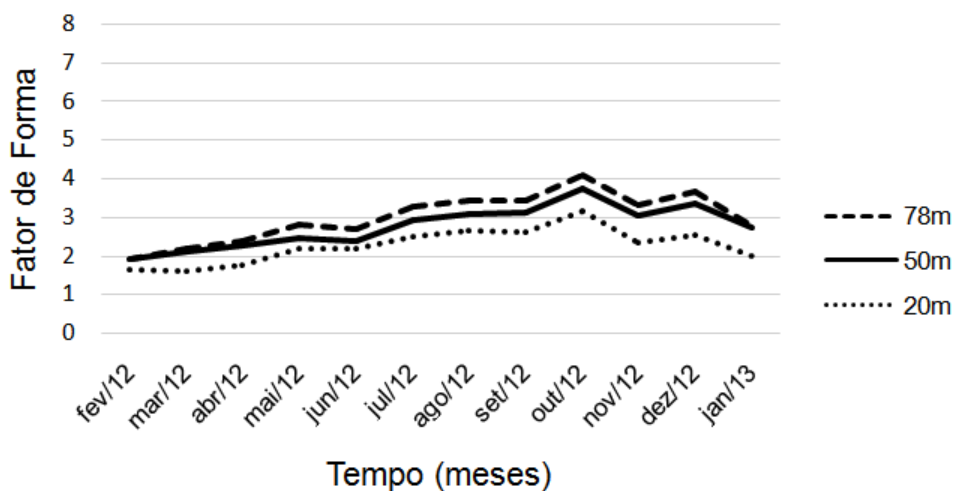


Figura 11 - Variação do fator de forma ao longo do ano em Maracanaú.

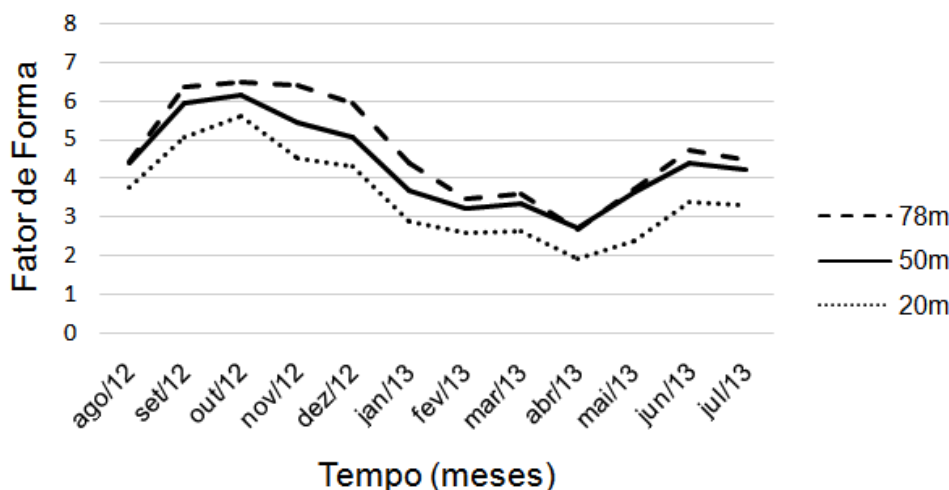


Figura 12 - Variação do fator de forma ao longo do ano em Parnaíba.

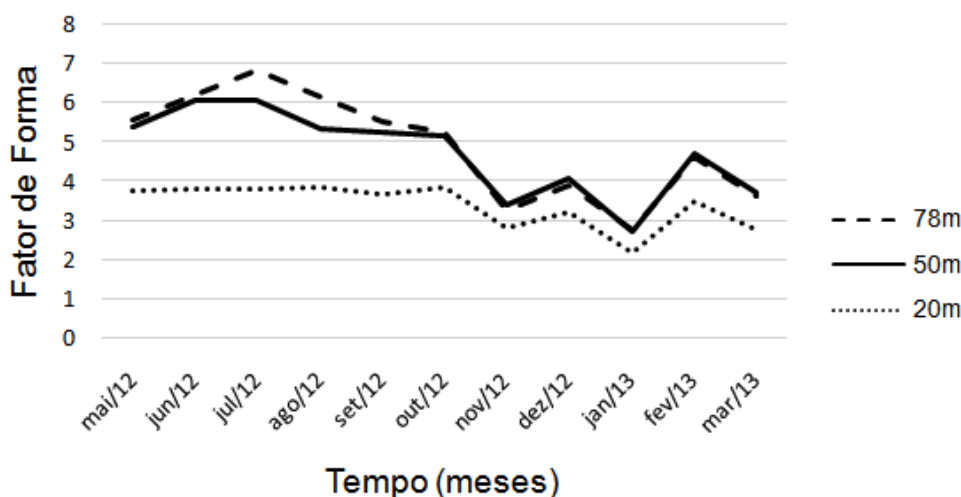


Figura 13 - Variação do fator de forma ao longo de onze meses em Petrolina.

Por meio das Figs. 11, 12 e 13, pode-se observar que a variação de k ao longo dos meses para as três localidades assume uma característica sazonal, com valores máximos ocorrendo no segundo semestre do ano, correspondendo à estação com pouco ou nenhuma chuva nas regiões.

3.3 Dia característico

As Figs. 14 e 15 apresentam o dia característico nos meses com melhores e piores médias de velocidade do vento nas três localidades. Através do dia característico, com médias horárias de velocidade do vento a um nível de referência de 78m de altura, nos três locais, foi possível realizar considerações sobre o comportamento diário da velocidade do vento. Essa análise objetiva verificar os períodos de maiores velocidades do vento durante o dia, para assim analisar o casamento ou não com os perfis das demandas e sendo também importante para se operar um parque eólico que venha a ser instalado nestes locais.

O vento nos meses com maiores médias nos três locais apresentam características diferentes em seu comportamento diário. Pode-se observar, na Fig. 14, que Parnaíba é o local que atinge, em outubro os maiores valores de velocidade do vento, chegando a mais de 10 m/s, com ventos mais intensos a partir de 13:00 horas, indo com essa tendência até 01:00 hora. Observa-se que Petrolina é o local que apresenta um comportamento diário mais constante no mês de maior intensidade de ventos, agosto, com uma pequena redução na intensidade dos ventos no período da manhã, e o restante do dia apresentando um comportamento de velocidade do vento em torno de 8 m/s. Em Maracanaú, no mês de outubro, o vento apresenta um comportamento bem definido, atingindo as maiores velocidades do vento entre 12:00 e 18:30, com sua intensidade reduzida no início da noite e período da manhã. Assim, nos meses de maiores médias de velocidade do vento para os três locais, Parnaíba e Petrolina apresentam um melhor comportamento diário, onde a amplitude dos valores de velocidade sofre uma menor variação e apresentando um comportamento, de forma geral, mais constante.

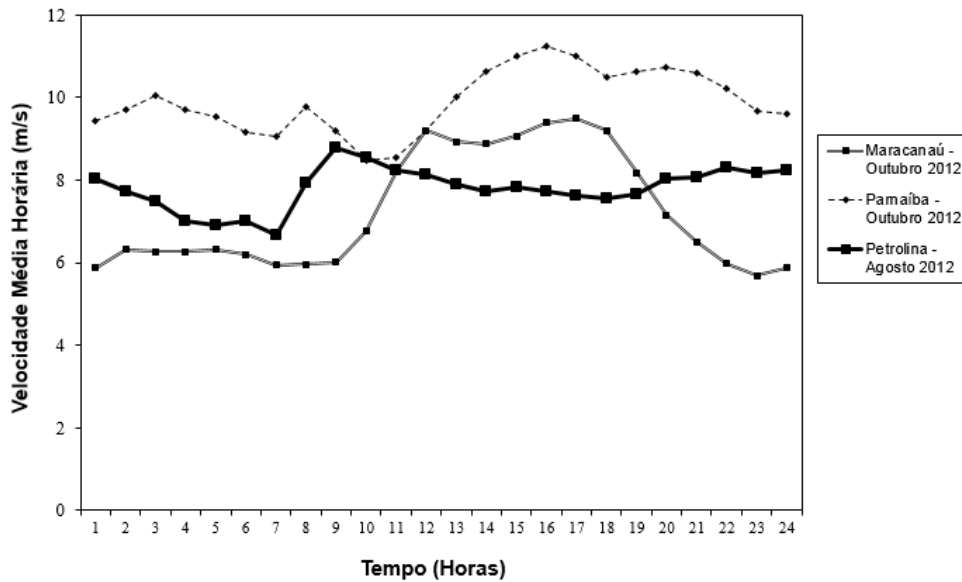


Figura 14 - Dia Característico para os meses com maiores médias de velocidade do vento em Maracanaú, Parnaíba e Petrolina

O vento nos meses com menores médias nos três locais apresenta características semelhantes aos meses de maiores médias, como pode ser observado na Fig. 15. Maracanaú, no mês de março, continua com um comportamento bem definido, atingindo as maiores velocidades no fim do período da manhã e toda a tarde (de 09:00 até 17:00 horas), e nesse período com velocidades superiores a 6 m/s. Petrolina continua tendo um comportamento constante, agora em torno de 6 m/s, com uma leve redução na amplitude no final da manhã até 22:00 horas da noite. A localidade de Parnaíba, no mês de abril, mês com menor média de velocidade, apresenta o mesmo comportamento diário do mês de maior média de velocidade, com ventos mais intensos a partir de 13:00 horas, indo com essa tendência até o início da manhã.

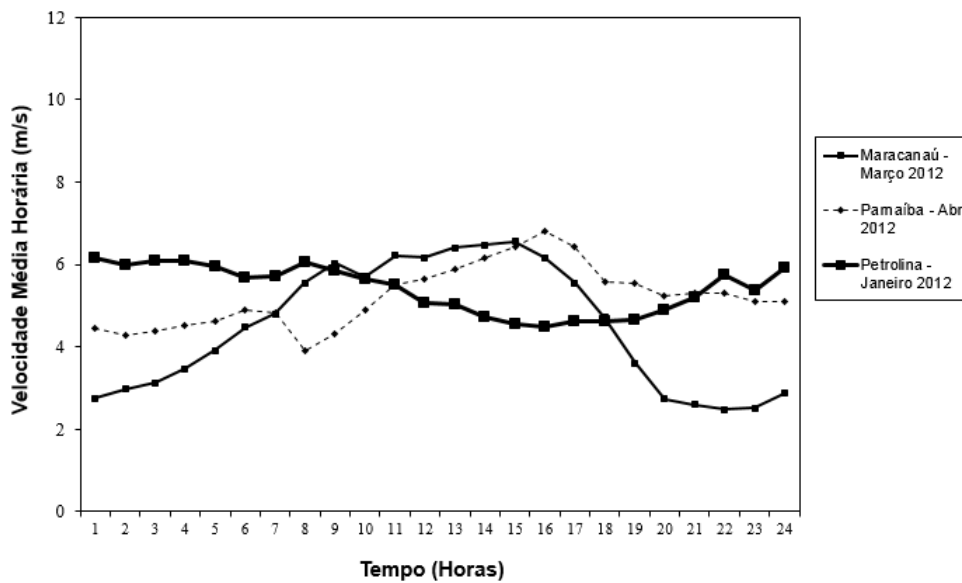


Figura 15 - Dia Característico para os meses com menores médias de velocidade do vento em Maracanaú, Parnaíba e Petrolina.

Identifica-se que todos os dias característicos, nos três locais, para os meses que apresentam melhores médias, possuem médias de velocidade do vento superiores a 8 m/s no horário que compreende 12:00 e 18:00 horas, sendo que Parnaíba apresenta o melhor potencial, chegando a atingir 11 m/s nesse período. Petrolina se destaca em relação a Maracanaú, por apresentar um comportamento mais constante durante o dia, com velocidade em torno de 8 m/s. Contudo Maracanaú, quando está no período da tarde, fica com velocidades superiores a Petrolina, atingindo 9 m/s.

4 CONCLUSÃO

A inserção segura da geração eolielétrica nos sistemas elétricos requer o desenvolvimento e aprimoramento de metodologias para modelagem do comportamento estocástico do vento e contribuir para o auxílio na seleção de modelos de turbinas, no dimensionamento e operação de parques eólicos e na sua integração ao sistema elétrico. Dado o comportamento aleatório do vento, a exploração dos recursos eólicos deve basear-se em uma análise estatística da velocidade do vento com a finalidade de obter parâmetros que venham a auxiliar nas tomadas de decisão.

Os padrões de vento que apresentam o melhor potencial para aproveitamento eólico, dentre as regiões do Nordeste avaliadas no presente artigo, são os de Parnaíba e Petrolina, embora os valores observados em Maracanaú não sejam insatisfatórios. A maior regularidade no comportamento diário dos ventos em Parnaíba e Petrolina também é um ponto positivo a se destacar, sendo que essa baixa variabilidade ficou mais destacada em Petrolina.

Parnaíba, mesmo nos meses de menor média de velocidade do vento, consegue atingir ocorrências diárias entre 5 a 6 m/s e nos meses com melhores médias chega a atingir 11,5 m/s. Petrolina também se destaca nesse aspecto, nos meses de menores médias de velocidade do vento chegando a atingir velocidades entre 6 e 7 m/s e nos meses com maior potencial chegando a ocorrências diárias de velocidades em torno de 8 m/s. Maracanaú chega a atingir ocorrências de até 9 m/s nos melhores meses, ficando em torno de 3 e 6 m/s nos meses de menores médias; as velocidades nessa localidade possuem uma alta variabilidade, apresentando muitas ondulações nos valores de velocidade.

Agradecimentos

A CAPES pela concessão de bolsa no curso de mestrado em Engenharia Elétrica do primeiro autor na Universidade Federal do Ceará.

Ao CNPq pelo financiamento do Projeto “Previsão de potencial eólico visando operação integrada ótima de unidades geradoras de eletricidade: estudo de caso para o Nordeste do Brasil”.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Energia Eólica. <http://www.abeeolica.org.br>. Acessado em: 07 de outubro de 2013.
- Carvalho, P.C.M., 2003. Geração eólica. 146p. 1ª edição, Fortaleza – CE, Editora Imprensa Universitária.
- Dalmas, A. 2007. Estudo do potencial eólico e previsão de ventos para geração de eletricidade em Santa Catarina. Dissertação de mestrado, UFSC, Santa Catarina.
- Maceira, M. E. P., Penna, D. D. J., Pessanha, J. F. M., Melo, A. C. G., 2011. Modelagem estatística de ventos para utilização nos modelos de planejamento e operação. Florianópolis – Santa Catarina. XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica.
- Malta, C. S. 2009. Estudo de séries temporais de vento utilizando análise estatística e agrupamento de dados, Dissertação de Mestrado, Escola politécnica, UFRJ, Rio de Janeiro.
- Rocha, P. A. C., Sousa, R. C., Andrade, C. F., Silva, M. E. V. 2012. Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil, Applied Energy, vol. 89. Pp. 395-400.
- www.ibge.gov.br Acessado em 18 de novembro de 2013.

CHARACTERIZATION OF WIND POTENTIAL: STUDY OF CASE FOR MARACANAÚ (CE), PETROLINA (PE) AND PARNAÍBA (PI)

Abstract. *In recent years wind energy use is becoming competitive worldwide, making its participation more and more significant in electric power systems. The present paper shows a statistical analysis to characterize the wind potential of Maracanaú – CE, Petrolina - PE and Parnaíba -PI, in the northeastern of Brazil. Statistical analysis allows understanding of the future behavior of the stochastic process associated with the wind speed, aiming to estimate the electricity generation and the capacity factor of wind turbines, wind potential assessment of regions of interest and the impacts associated with operation of electrical systems. This statistical analysis of series of wind speed is performed to detect seasonality patterns and behaviors that may assist in the description of the stochastic process. Average standards with top wind speeds occurred in Parnaíba (10 and 11m / s - best month of the year) followed by Petrolina (8 and 9 m / s - best month of the year). The regularity of the wind speed makes these regions favorable for the use of wind power.*

Key words: *Wind Power, Wind Speed Series, Statistical Analysis.*