

# Análise estatística da velocidade de vento do estado do Ceará

**Henrique do Nascimento**

**Camelo**

Universidade Estadual do Ceará (UECE) - Faculdade de Ciências e Letras de Iguatu (FECLI), Depto. de Física, Fortaleza, CE, Brasil, henriquecamelo13@yahoo.com.br.

**Paulo C. M. Carvalho**

Universidade Federal do Ceará (UFC), Depto. de Engenharia Elétrica, Fortaleza, CE, Brasil, carvalho@dee.ufc.br.

**João Bosco Verçosa Leal Junior**

Universidade Estadual do Ceará (UECE), Depto. de Física, Fortaleza, CE, Brasil, jblealjr@uece.br.

**João Bosco Passos Accioly Filho**

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Depto. de Monitoramento Hidroambiental (DEPAM/FUNCEME), Fortaleza, CE, Brasil, bosco@funceme.br.

## Resumo

Nesse artigo é feita uma análise estatística da velocidade do vento no estado do Ceará, Nordeste Brasileiro, objetivando localidades cujo potencial eólico pode ser aproveitado para geração de energia elétrica. São verificados os períodos de maior intensidade da velocidade do vento no estado; também é comparado o regime de ventos em regiões geograficamente distintas. Através dos dados de velocidade do vento a 10 metros de altura, em 15 estações meteorológicas distribuídas ao longo do estado para 2005, representando médias horárias, é feito uma extrapolação para altura de 70 m, de forma que é verificado que a maior intensidade da velocidade do vento ocorre no período diurno. Na faixa litorânea, identificam-se localidades com velocidade média de ventos superiores a 10 m/s, como são os casos de Acaraú e Barroquinha. Já em localidades serranas, observam-se valores médios superiores a 8 m/s, como é o caso de Ubajara. Os valores do fator de forma da função de Weibull para pontos do litoral no período seco estão de acordo com os encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** *Velocidade de vento. Análise estatística. Distribuição de Weibull.*

## Abstract

In the present paper a statistical analysis of the wind speed in Ceará state, Northeast Brazilian, is made aiming to places whose wind energy potential can be used to electricity production. The best periods for wind energy use are shown; wind speeds from different sites are compared. Wind speed data measured at 70 meters height in the state for the 2005 show that the best wind speed values are found in the diurnal period. In the coastal area, sites with average wind speeds higher than 10 m/s are found, as Acaraú and Barroquinha. On the mountains, sites with average wind speeds higher than 8 m/s are found, as Ubajara. Shape factor values of the Weibull distribution for sites in the coast in the dry period are in agreement with those found in the literature.

**Keywords:** *speed. Statistical analysis. Weibull distribution.*

## 1 Introdução

Atualmente, muito se tem falado em fontes alternativas de energia. O fato é que não se pode pensar somente em substituição de fontes de energia, mas é necessário garantir que as gerações futuras possam viver em um mundo saudável. Para isso, é preciso investir em pesquisas de energias limpas e renováveis, como uma forma de alcançar um desenvolvimento sustentável.

No Brasil, os primeiros anemômetros para medir o potencial eólico visando geração de eletricidade foram instalados no Estado do Ceará e em Fernando de Noronha no início da década de 1990. O Ceará está localizado na região Nordeste do Brasil, com uma área territorial de aproximadamente 147.348 km<sup>2</sup>. Seu regime de ventos possui forte influência dos ventos alísios, os quais fazem parte da circulação global atmosférica. No segundo semestre do ano, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) migra para sua posição mais ao norte de sua normal climatológica. É nessa época que os ventos alísios são mais intensos sobre o estado, definindo todo um padrão de circulação local.

Informações sobre o potencial eólico do Ceará, a níveis de 50 e 70 m de altura, podem ser obtidas através do Mapa do Potencial Eólico do Ceará (SEINFRACE, 2001). Nesse estudo é possível encontrar informações sobre aspectos climatológicos, dados anemométricos, características do relevo, rugosidade e densidade do ar. Pode ser observado também que a região litorânea é a mais privilegiada em termos de potencial eólico.

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), criado em 26 de abril de 2002 pelo Governo Federal Brasileiro e coordenado pelo Ministério das Minas e Energia (MME), tem como objetivo obter um caminho limpo para o desenvolvimento, através da motivação da utilização de fontes renováveis, como é o caso da energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas.

A Tab. (1), apresenta a distribuição dos parques eólicos do PROINFA, com o Ceará assumindo a liderança brasileira com cerca de 36% da potência instalada. Quando em operação, os parques do PROINFA no estado poderão ter um impacto expressivo na matriz energética do Ceará.

**Tabela 1:** Distribuição dos parques eólicos do PROINFA.

Estado	Número de projetos	Potência (MW)	Participação (%)
Ceará	14	500,530	36,24
Piauí	1	17,950	1,30
Pernambuco	5	21,250	1,54
Rio Grande do Norte	3	165,000	11,95
Rio Grande do Sul	5	227,562	16,48
Santa Catarina	11	226,730	16,42
Paraíba	13	59,150	4,28
Rio de Janeiro	2	163,050	11,80
<b>TOTAL</b>	<b>54</b>	<b>1.381,222</b>	<b>100,00</b>

O estado do Ceará é pioneiro em instalação de parques eólicos em dunas. A potência instalada atualmente é da ordem de 17,4 MW, dividida através dos parques da Prainha (10 MW), Taíba (5 MW) e Mucuripe (2,4 MW). Estudos estimam que o Ceará possua a capacidade para uma produção de 51,9 TWh/ano, considerando uma altura de 70 m e ventos a partir de 7 m/s (SEINFRA, 2001).

## 2 Região de estudo e dados utilizados

Os dados de velocidade do vento foram coletados a partir de Plataformas de coleta de Dados (PCD), pertencentes à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), instaladas em diversas áreas do território do estado do Ceará. Vale ressaltar que, além dessas PCDs fornecerem dados de velocidade do vento, é possível obter outras variáveis, como pressão atmosférica, temperatura do ar, radiação solar incidente, umidade relativa, direção da velocidade do vento, precipitação, dentre outras.

Os dados de velocidade do vento são constituídos de médias horárias, a um nível de 10 m de altura em relação ao solo. Mas, para efeito de se verificar o potencial eólico, os resultados serão apresentados de forma extrapolada, ou seja, ao nível de 70 m de altura. Essa escolha foi feita pelo fato desta altura estar de acordo com o atual estágio de desenvolvimento das turbinas eólicas comerciais empregadas para geração de eletricidade em nível mundial na faixa de MW.

Foram analisados, no presente estudo, todos os dias do ano de 2005, por se tratar de um período com o maior número de PCDs no estado com dados válidos. Como forma de padronizar as regiões de estudo, foi feita uma divisão das PCDs em 5 grupos. Essa divisão leva em conta localidades que possuem geografias similares:

Litoral: Acaraú, Barroquinha e Icapuí;

Serra: Maranguape, São Benedito e Ubajara;

Norte: Jaguaruana, Santa Quitéria e Sobral;

Sertão Central: Acopiara, Quixadá e Icó;

Sul: Jati, Lavras e Santana do Cariri.

Fig. 2.1 apresenta a localização das PCDs mencionadas. Em cada grupo será verificado: média da intensidade da velocidade do vento (perfil diário), considerando todos os meses de 2005; comparação da velocidade do vento na estação chuvosa (fevereiro, março, abril e maio) com a estação seca (setembro, outubro, novembro e dezembro); os parâmetros da distribuição de Weibull; e correlação estatística entre regiões distintas do estado tomando como referência uma localidade litorânea.

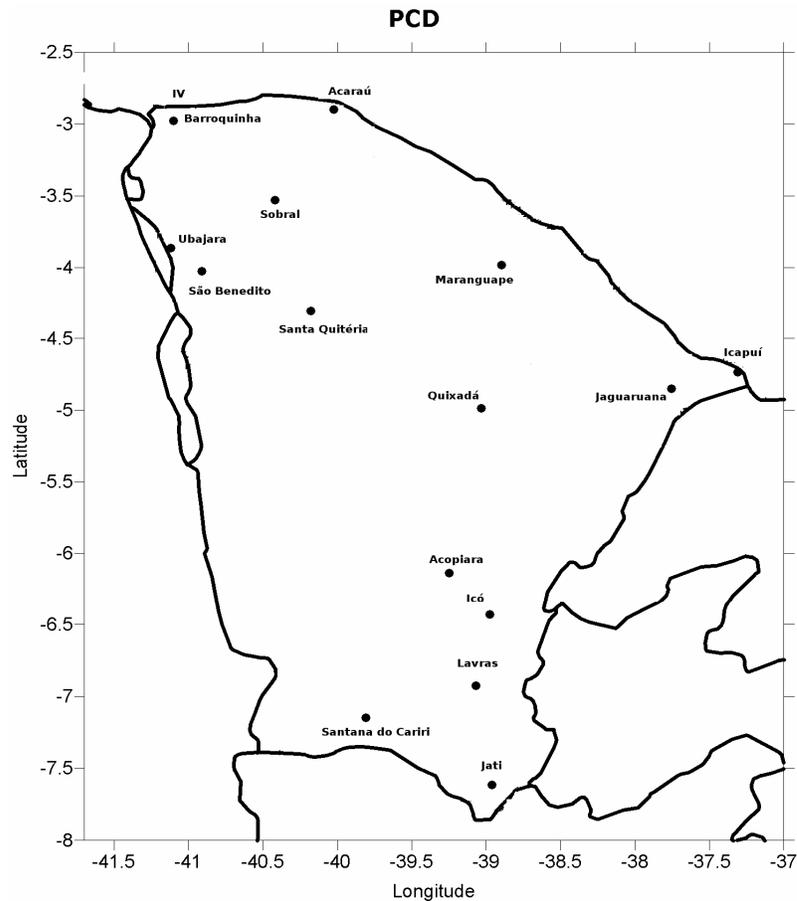


Figura 2.1: Mapa do estado do Ceará com as PCDs da FUNCEME.

## 2.1 Formulação matemática

Para descrever o comportamento da distribuição de frequência de velocidade do vento inúmeros modelos estatísticos têm sido utilizados. Entretanto, maior atenção vem sendo dada para a distribuição de Weibull, cujo modelo apresenta um bom ajuste para os dados de velocidade do vento, como indicado por Lun *et al.* (2000). Justus *et al.* (1978) aplicaram modelos estatísticos para dados de mais de 100 estações meteorológicas nos Estados Unidos e concluíram que a distribuição de Weibull foi a que apresentou o melhor ajuste. Essa função pode ser representada da seguinte forma:

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

onde  $v$  é a velocidade do vento,  $c$  é o parâmetro de escala dado em (m/s) e  $k$  é o parâmetro de forma (adimensional).

Através de uma série temporal da velocidade do vento é possível encontrar na literatura vários métodos para se determinar os parâmetros  $c$  e  $k$  de Weibull. Para isso, faz-se necessário os valores da velocidade média, desvio padrão e também a utilização da função gama  $\Gamma(\lambda)$ , como proposto por (Weisser, 2003),

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1,086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad (2)$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (3)$$

A velocidade média  $\bar{v}$  e o desvio padrão  $\sigma$  podem ser calculados através das seguintes relações:

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \left( \sum_{i=0}^T v_i \right). \quad (4)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (v - \bar{v})^2 dt} \quad (5)$$

onde T é o número de horas no período de tempo considerado.

A função gama, definida para um número real e não nulo é dada por Gökçek *et al.* (2007):

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} x^{y-1} \exp(-x) dx. \quad (6)$$

O coeficiente de correlação estatística pode ser definido como um parâmetro matemático que viabiliza o grau de comparação de duas variáveis x e y, representado por:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]} \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \right]}} \quad (7)$$

onde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  representam valores médios. Na Eq. (7), assumem-se apenas valores entre -1 e 1. Quando  $r = 1$ , significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis (valores máximos ocorrem ao mesmo tempo). Porém, quando  $r = -1$ , significa uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra diminui. Se  $r = 0$  significa que as duas variáveis não estão relacionadas, maiores detalhes poderão ser obtidos sobre correlação estatística em (Fonseca, 1985).

Na literatura, os métodos mais utilizados para a estimativa da variação da velocidade de vento com a altura podem ser descritos por dois modelos matemáticos: lei logarítmica e a lei de potência (Manwell *et al.*, 2002). A lei logarítmica é uma combinação de pesquisa teórica e empírica originada de fluxo de camada de limite em dinâmica dos fluidos. Esta lei é usada para variação de velocidade de vento vertical modelada em uma condição de terreno particular. A lei logarítmica é determinada pela seguinte equação:

$$v(h) = v_{ref} \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_{ref}/z_0)} \quad (8)$$

onde  $h_{ref}$ , representa a altura de referência da medida da velocidade,  $v_{ref}$  medida nesta altura de referência.

A lei de potência é um modelo semelhante que representa o perfil da velocidade do vento:

$$v(h) = v_{ref} \left( \frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha \quad (9)$$

onde  $\alpha$  é chamado de expoente de camada limite e varia em função da rugosidade da superfície. Para terrenos planos, cobertos com capim, pode ser aplicada  $\alpha$  aproximadamente igual a 0,14. A lei de potência varia com parâmetros como altura, tempo do dia, estação, terreno, temperatura, vento etc. Uma correlação com este modelo e o comprimento de rugosidade é determinada por (Manwell *et al.*, 2002):

$$\alpha = 0,096 \log_{10} z_0 + 0,016(\log_{10} z_0)^2 + 0,24 \quad (10)$$

Vale ressaltar que as Eqs. (8) e (9) se aplicam para terrenos planos e homogêneos, ou seja, possuem limitações em relação à dependência do tipo de terreno, à velocidade do vento, a modificações na rugosidade da superfície e também à influência de variáveis meteorológicas, como por exemplo, a temperatura do ar e pressão atmosférica.

A partir de medidas de velocidade do vento a um dado nível de referência é possível fazer uma estimativa do comprimento de rugosidade médio característico da região de estudo. O comprimento de rugosidade é um número positivo e um parâmetro que representa a altura abaixo da qual a velocidade do vento é nula (Tohm, 1975). Através do perfil vertical da velocidade do vento, considerando condições adiabáticas, é possível encontrar uma expressão para o cálculo do comprimento de rugosidade, seguindo as seguintes etapas,

$$v(h) = \frac{u^*}{k} \ln \left( \frac{h}{z_0} \right) \quad (11)$$

onde  $v(h)$  é velocidade de vento em uma altura  $h$  de referência,  $u^*$  é velocidade de fricção (m/s), e  $k$  é a constante de Von Kármán, um número adimensional cujo valor é 0,4 e  $z_0$  é o comprimento de rugosidade medido em (m). Ainda maiores detalhes sobre a Eq. (11), pode ser encontrado em (Stull, 1988).

Além de métodos baseados no perfil vertical da velocidade do vento, existem métodos fundamentados na análise do desvio padrão da componente horizontal da velocidade de vento em condições adiabáticas (Beljaars, A. C., e A. A. M. Holtslag, 1991). A base do método é a equação que tem a seguinte relação:

$$\frac{\sigma_v}{u} = 2,5. \quad (12)$$

Quando substituída essa última relação na Eq. (11), é obtida uma expressão para a estimativa do comprimento de rugosidade médio, ou seja,

$$\bar{z}_0 = h_{ref} e^{-\frac{\bar{v}_{ref}}{\sigma_v}}. \quad (13)$$

O valor de  $z_0$  pode variar com a direção da velocidade do vento, e, ainda, entre os meses de verão e de inverno. Esses parâmetros devem ser levados em consideração quando se analisa a característica eólica de uma região. Dessa forma, a Eq. (13) possui limitação, representando apenas uma estimativa média do comprimento de rugosidade.

No estado do Ceará, como exemplos de fatores que exercem influência na rugosidade da superfície, podem ser citadas as variações sazonais de vegetação observadas no interior do estado em consequência da alternância das estações chuvosa e seca. De acordo com (SEINFRA, 2001), dentre as principais espécies de vegetação do interior do Ceará, pode ser citada a Jurema Preta como a de maior influência na variação sazonal da rugosidade.

### 3 Resultados

#### 3.1 Verificação da intensidade média da velocidade do vento

Através dos cálculos de médias horárias de velocidade do vento, a um nível de referência a 70 m de altura em relação ao solo das PCDs analisadas nos citados grupos, foi possível emitir considerações acerca do potencial eólico do estado do Ceará.

Na figura 3.1 é observado que, na maioria das PCDs analisadas, a média de velocidade de vento tem uma maior intensidade nos horários de 06:00h às 18:00h, horário local, sendo que a única exceção é a PCD de Icapuí, em que é verificada uma maior intensidade da média da velocidade de vento, principalmente entre 18:00h e 23:00h, horário local, chegando a atingir máximo de velocidade média acima de 8,0 m/s às 22:00h.

Na figura 3.2 é verificado que todas as PCDs analisadas apresentam médias de velocidade do vento maiores nos horários de 06:00h às 18:00h como, por exemplo, na PCD de Quixadá, que é bem representativa. A maior intensidade durante o dia, na PCD citada, chegou a atingir valores médios de aproximadamente 8,5 m/s às 10:00h.

Na figura 3.3 identifica-se que todas as PCDs estudadas possuem médias de velocidade de vento superiores nos horários de 06:00h às 18:00h, em relação às médias do período noturno. Destaca-se ainda que, nesse grupo, a PCD de Jati é a que apresenta os maiores valores em relação às demais PCDs, atingindo médias durante o dia de aproximadamente 8,5 m/s.

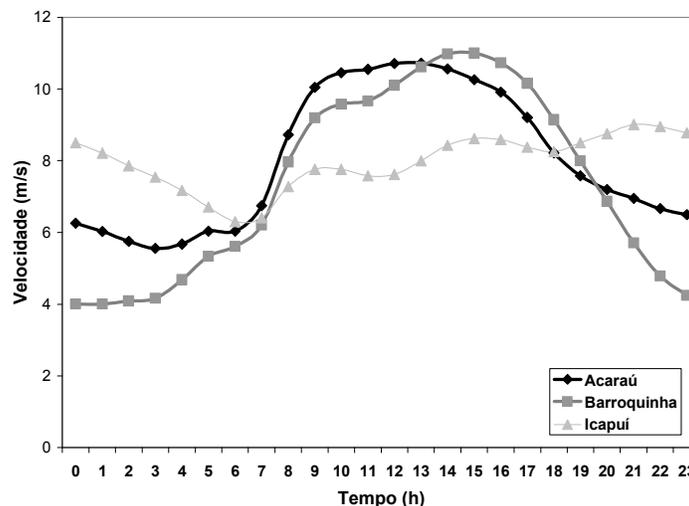


Figura 3.1: Média horária da velocidade do vento, representando as PCDs do Litoral.

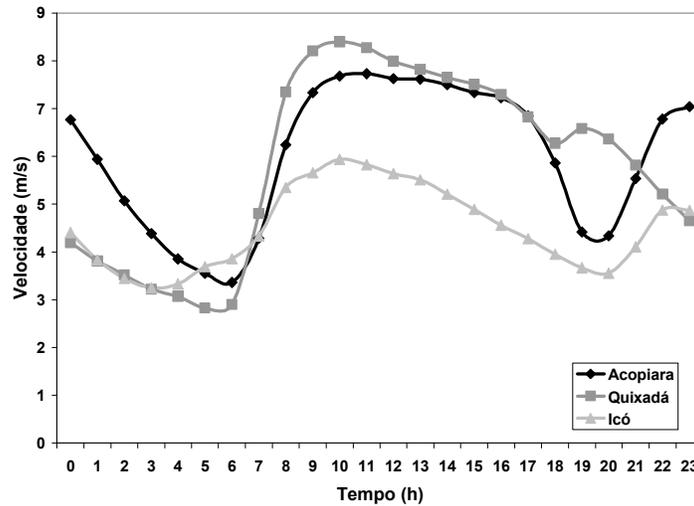


Figura 3.2: Média horária da velocidade do vento, representando as PCDs do Sertão.

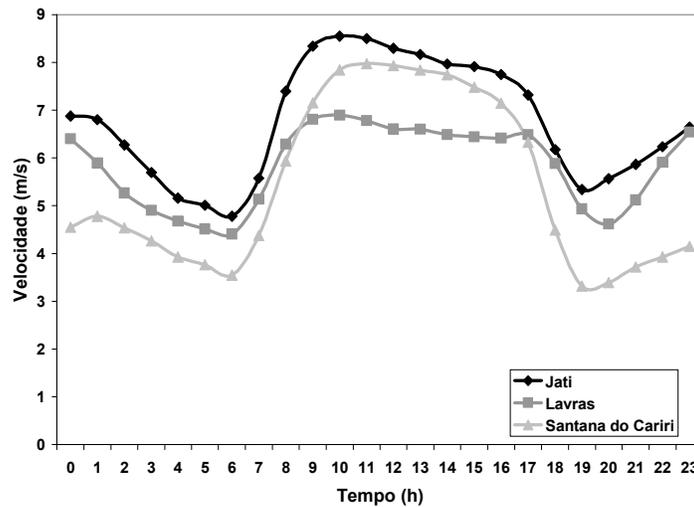


Figura 3.3: Média horária da velocidade do vento, representando as PCDs do Sul.

Na figura 3.4 observa-se que, na maioria das PCDs, as maiores intensidades nas médias de velocidade do vento estão também entre os horários de 06:00h às 18:00h, como, por exemplo, a PCD de Jaguaruana, que atingiu valores de velocidade média horária superiores a 10,0 m/s durante o dia. A única exceção nesse grupo foi a PCD de Sobral, na qual se verifica que a maior intensidade da média de velocidade do vento é nos horários noturnos, de 18:00h às 23:00h, com valores de aproximadamente 8,5 m/s.

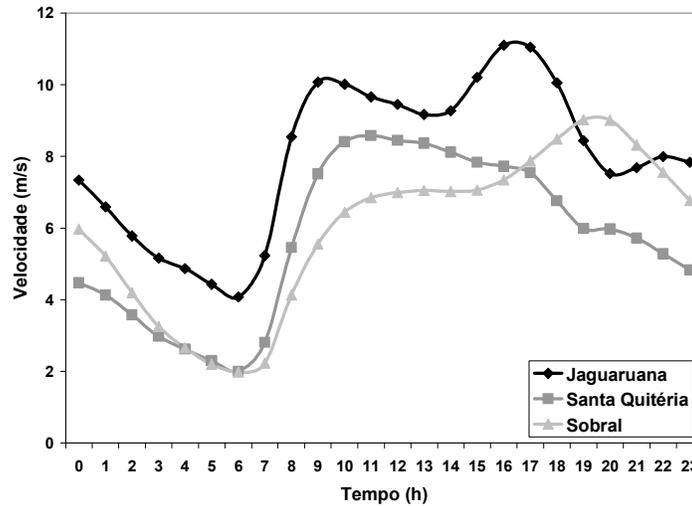


Figura 3.4: Média horária da velocidade do vento, representando as PCDs do Norte.

Na figura 3.5 observa-se que, em todas as PCDs analisadas, os maiores valores das médias de velocidade do vento estão nos horários de 06:00h às 18:00h. A PCD de Ubajara apresentou uma maior intensidade do vento em relação às demais, em todos os horários analisados. A média da velocidade do vento nessa cidade chegou a atingir valor máximo acima de 13,0 m/s às 09:00h. Ainda sobre essa localidade, Sacramento *et al.* (2006) apresenta a possibilidade de aproveitamento do potencial eólico dessa região serrana para aplicações em geração de energia elétrica.

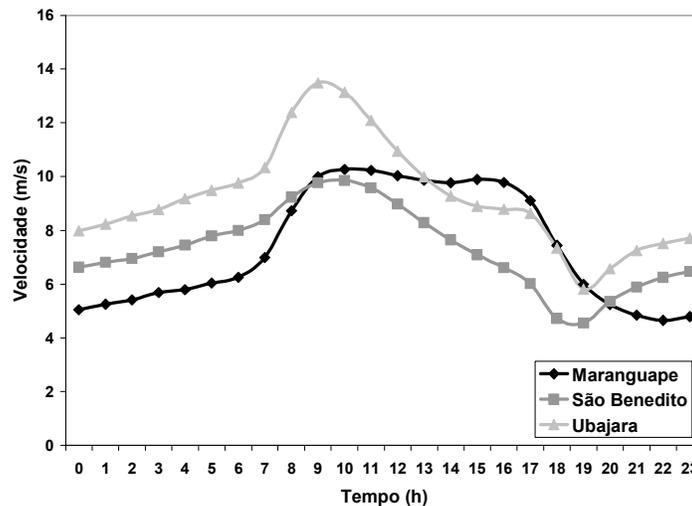
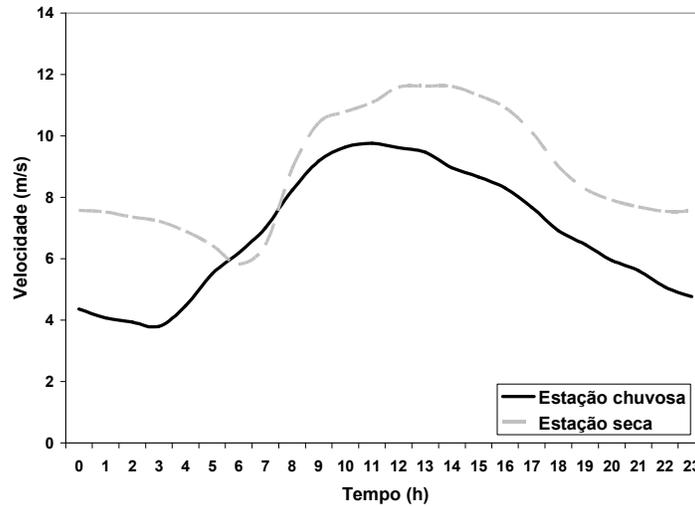


Figura 3.5: Média horária da velocidade do vento, representando as PCDs da Serra.

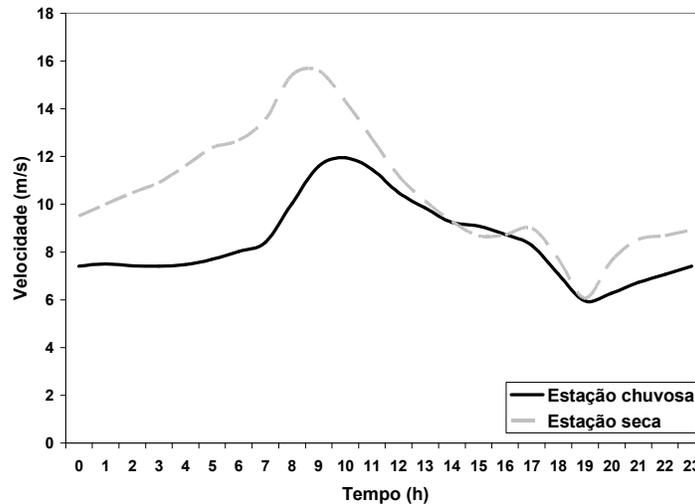
### 3.2 Comparação da velocidade do vento para as estações chuvosa e seca

Neste item são apresentadas apenas as PCDs que tiveram maiores destaques em relação à intensidade da velocidade do vento. Dessa forma, a Fig. 3.6 apresenta o perfil horário da velocidade média do vento para Acaraú (Litoral), comparando-se os períodos da estação chuvosa e seca. Como esperado, os ventos são mais intensos na estação seca, chegando a atingir valor médio máximo, acima de 11 m/s, às 14:00hs local.



**Figura 3.6:** Comparação da velocidade média do vento entre as estações chuvosa e seca para Acaraú (Litoral).

A Fig. 3.7 mostra o perfil horário da velocidade média do vento em Ubajara (Serra), comparando-se os períodos da estação chuvosa e seca. Na estação seca os ventos são mais intensos, chegando a atingir valor médio máximo acima de 15 m/s, às 09:00hs local.



**Figura 3.7:** Comparação da velocidade média do vento entre as estações chuvosa e seca para Ubajara (Serra).

A Fig. 3.8 apresenta o perfil horário da velocidade média do vento em Jaguaruana (Norte), comparando-se os períodos da estação chuvosa e seca. Muito embora Jaguaruana tenha sido classificada como estando na região norte, sua real localização geográfica encontra-se no leste do estado e possui uma distância de Icapuí (litoral) de aproximadamente 112 km. Na estação seca os ventos são mais intensos, chegando a atingir valor médio máximo acima de 12 m/s, às 18:00hs local.

A Fig. 3.9 mostra o perfil horário da velocidade média do vento em Acopiara (Sertão), comparando-se os períodos da estação chuvosa e seca. Na estação seca os ventos são mais intensos, chegando a atingir valor médio máximo acima de 7 m/s, às 09:00hs local.

A Fig. 3.10 apresenta o perfil horário da velocidade média do vento em Jati (sul), comparando-se os períodos da estação chuvosa e seca. Na estação seca, na maioria dos horários os ventos são mais intensos, chegando a atingir valor médio máximo acima de 8 m/s as 09:00hs, local. Porém, existe horários em que a velocidade média do vento na estação chuvosa chega a superar a da estação seca, como por exemplo, entre 10:00 e 16:hs local.

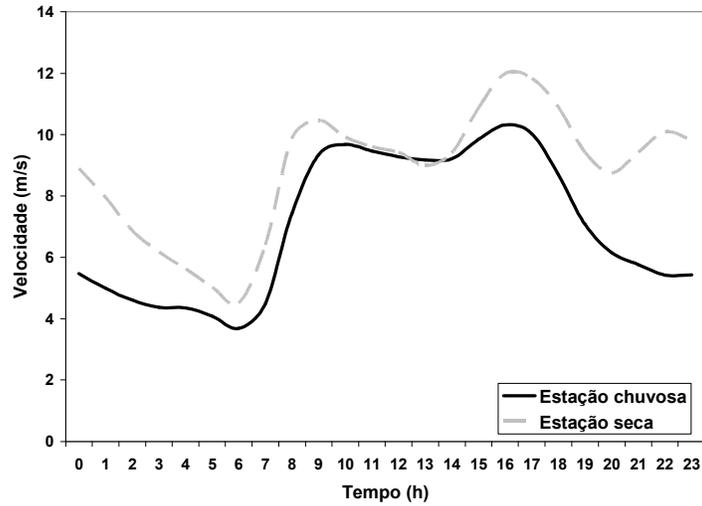


Figura 3.8: Comparação da velocidade média do vento entre as estações chuvosa e seca para Jaguaruana (Norte).

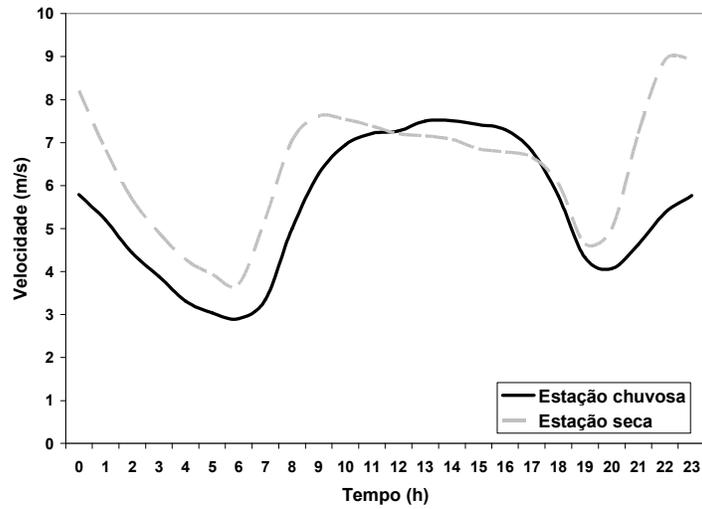


Figura 3.9: Comparação da velocidade média do vento entre as estações chuvosa e seca para Acopiara (Sertão).

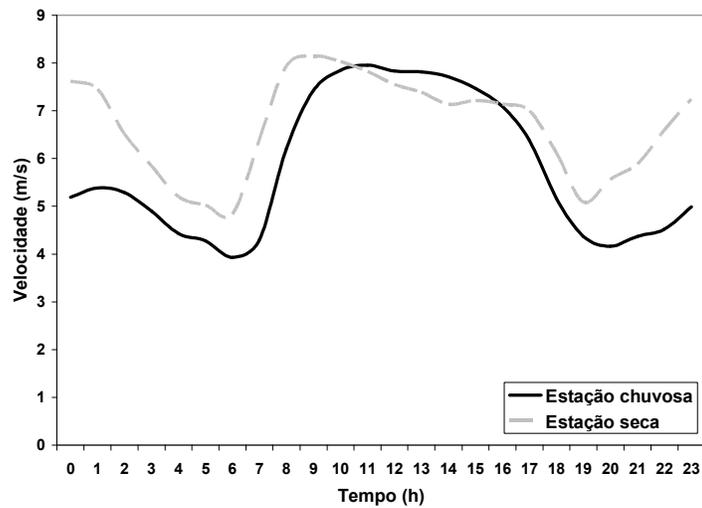


Figura 3.10: Comparação da velocidade média do vento entre as estações chuvosa e seca para Jati (Sul).

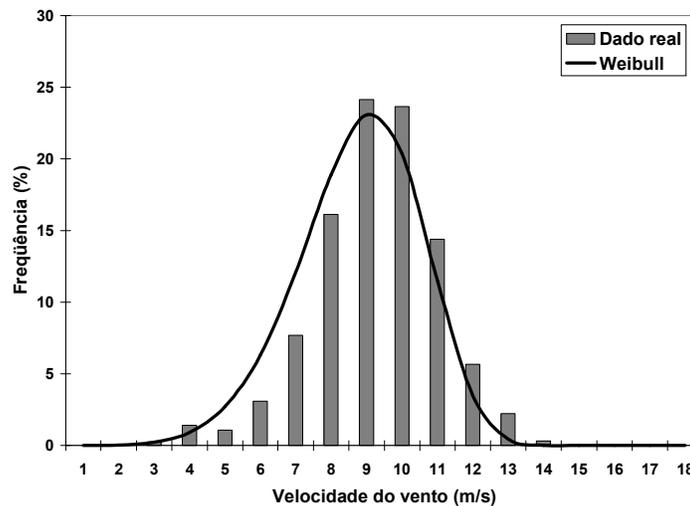
### 3.3 Parâmetros da função distribuição de Weibull

Na Tab. (2) são apresentados os parâmetros de Weibull,  $k$  (fator de forma) e  $c$  (fator de escala), que definem a distribuição estatística e estão relacionados, respectivamente, à forma da curva e à velocidade média do vento, para cada PDC analisada, em ordem alfabética, com sua respectiva localização. Foram utilizados apenas os dados de velocidade do vento relativos ao segundo semestre do ano (julho a dezembro); esse período, como já foi dito antes, representa a estação seca no Ceará, isso é, meses em que a velocidade do vento é mais intensa, conforme seção 3.2.

Para o fator de forma, o maior valor foi encontrado em Icapuí (litoral), igual a 5,88. A curva de Weibull, em função desse valor, pode representar um maior estreitamento na faixa de velocidade do vento entre 8 e 11 m/s, como pode ser visto na Fig. 3.11. Pode ser observado também que o valor mais freqüente da velocidade média do vento foi de 9 m/s, com um percentual de aproximadamente (24%) do período analisado.

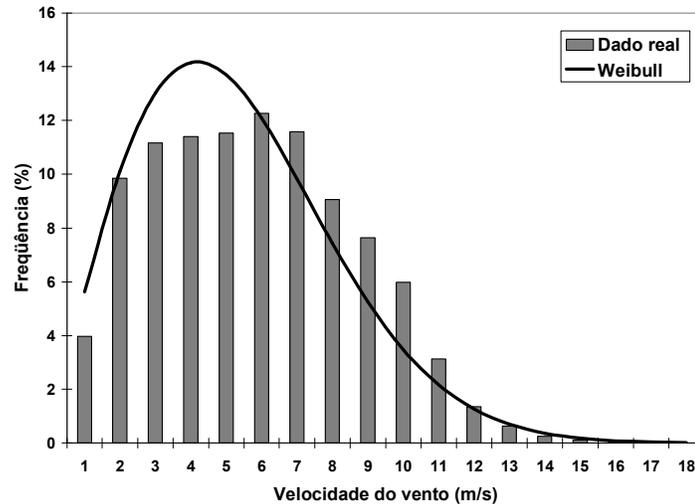
**Tabela 2:** Parâmetros de Weibull para todas as PCDs analisadas (julho a dezembro).

PCD	Localização	$k$ (adimensional)	$c$ (m/s)
Acaraú	litoral	3,83	10,54
Acopiara	sertão	1,97	5,99
Barroquinha	litoral	2,12	10,14
Icapuí	litoral	5,87	9,46
Icó	sertão	1,98	5,81
Jaguaruana	norte	2,98	10,49
Jati	sul	2,92	8,66
Lavras	sul	2,80	7,43
Maranguape	serra	3,05	9,62
Quixadá	sertão	2,58	7,5
São Benedito	serra	3,12	8,93
Santana do Cariri	sul	2,23	7,49
Sobral	norte	2,06	8,12
Santa Quitéria	norte	2,31	7,97
Ubajara	serra	2,81	11,35



**Figura 3.11:** Distribuição de frequência para velocidade média do vento em Icapuí (Litoral), no período relativo à estação seca (julho a dezembro).

O menor valor do fator de forma foi encontrado em Acopiara (sertão), igual a 1,97. A curva de Weibull teve um maior estreitamento entre a faixa de velocidade do vento de 3 a 6 m/s, como pode ser observado na Fig. 3.12. E o valor da velocidade média do vento mais freqüente foi de 6 m/s em aproximadamente (12%) do período analisado.

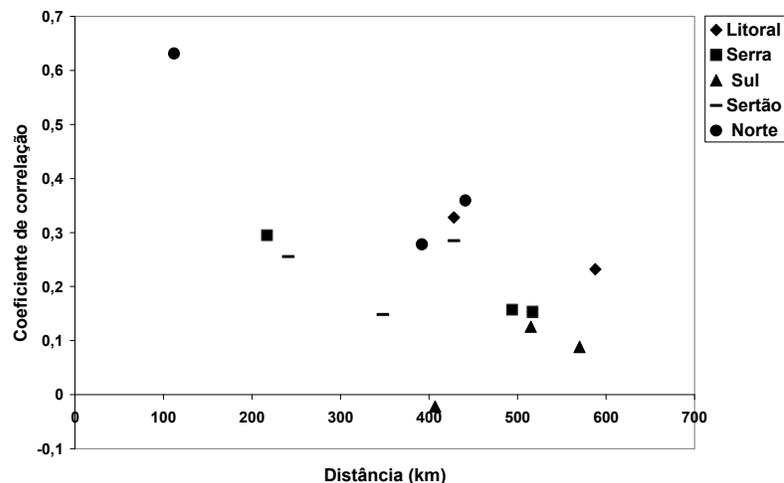


**Figura 3.12:** Distribuição de frequência para velocidade média do vento em Acopiara (Sertão), no período relativo à estação seca (julho a dezembro).

De modo geral, para o estado como um todo podem ser considerados os seguintes valores para o fator de forma: no período seco 4,12 para o interior e 5,85 para o litoral, de acordo com (SEINFRA, 2001). Esse último valor, de fato, pode ser encontrado para a região litorânea de Icapuí. Já para as regiões do interior do Ceará, as localidades que mais se aproximaram do valor sugerido foram as de Maranguape com 3,05 e São Benedito com 3,12, ambas localidades serranas.

### 3.4 Correlações estatísticas entre regiões distintas

A correlação estatística entre regiões envolveu localidades geograficamente similares e distintas. Foram utilizados todos os dias do ano de 2005 para os dados de velocidade de vento a 70 m de altura. Tomando como referência a PCD de Icapuí (litoral), a Fig. 3.13 apresenta a representação do coeficiente de correlação estatística em função da distância.



**Figura 3.13:** Correlação estatística de velocidade média do vento tomando com referência Icapuí (Litoral).

As cidades que estão mais distantes de Icapuí, como Jati (sul), distante aproximadamente 512 km, apresenta uma fraca correlação de 0,17. Em Lavras (Sul), distante 407 km de Icapuí, verificou-se uma pequena anticorrelação de -0,022. A cidade em que se verificou uma melhor correlação com Icapuí não foi uma cidade litorânea e sim uma cidade classificada como norte (Jaguaruana), com valor de 0,63. Esse resultado mostra uma

maior correlação entre localidades mais próximas, tendo em vista que Jaguaruana está a 112 km de distância de Icapuí.

Em (Ackermann, 2005), pode ser observada correlação estatística em função da distância para a Alemanha. Nesse estudo, foi verificado que localidades que estão a um ponto de referência de até 200 km de distância possuem coeficiente de correlação abaixo de 0,2. Isso mostra que a velocidade do vento no estado do Ceará apresenta uma maior correlação estatística do que a encontrada em regiões da Europa. Como pode ser observado na Fig. 3.13, localidades que estão a uma distância de até 200 km possuem coeficiente de correlação acima de 0,3.

#### 4 Conclusão

De uma forma geral, os resultados da velocidade média do vento a 70 m de altura, para o ano de 2005, representando médias horárias para as PCDs dos Grupos: litoral, serra, sertão central, norte e sul, mostram que, na maioria das localidades, os ventos no Ceará são mais intensos durante o dia, ou seja, nos períodos entre 06:00 e 18:00hs, horário local.

As únicas exceções foram as PCDs de Sobral e Icapuí, onde fenômenos de escala local, ou até mesmo regional, podem ter influenciado nesse comportamento anômalo. Como uma das possíveis causas da maior intensidade da velocidade média do vento no período noturno podem ser mencionados fenômenos de características semelhantes ao vento Aracati, vento que surge em maior intensidade nas épocas secas do ano no Ceará em regiões ribeirinhas ao longo do Rio Jaguaribe, o principal rio perene do estado. Esse fenômeno provoca máximos de velocidade do vento no período noturno, e uma de suas possíveis causas pode estar associada à circulação de brisa marítima no litoral leste do estado, para o caso de Icapuí (Camelo, 2007). Já para o caso de Sobral, como não possui proximidade ao Rio Jaguaribe, futuramente, um estudo poderá mostrar se existe fenômeno similar ao vento Aracati nessa região, que também é banhada por um rio perene, ou seja, o Rio Acaraú.

O presente estudo confirmou localidades fora do litoral cearense, como a região serrana de Ubajara, com potencial eólico que pode ser explorado, tendo em vista que a velocidade média horária dos ventos possui valores superiores a 8 m/s, o que pode corresponder a um valor aplicável em geração de energia elétrica (Da Silva *et al.*, 2005).

Observa-se que as maiores intensidades da velocidade média do vento podem ser encontradas nos grupos: litoral e serra, como era de se esperar, de acordo com o Mapa do Potencial Eólico do Ceará (SEINFRA, 2001).

A distribuição de Weibull para a velocidade média do vento mostrou em Icapuí uma maior intensidade, na faixa de 8 a 11 m/s, para o período seco, com o fator de forma de 5,88, valor que está de acordo com Mapa do Potencial Eólico do Ceará.

Foi verificado também que a velocidade média do vento possui uma melhor correlação em função da distância para o Ceará em comparação aos valores encontrados na Alemanha. Esta informação é de fundamental importância visando o planejamento do sistema elétrico brasileiro, no tocante à relação entre parques eólicos e centrais hidro e termoelétricas.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à FUNCEME pela disponibilidade dos dados, ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará (UECE).

#### Referências

- ACKERMANN, T. *Wind power in power systems*. New York: Wiley, 2005. 691 p.
- BELJAARS, A. C.; HOLTSLAG, A. A. M. Flux parameterization over land surface for atmospheric models. *Journal Applied Meteorology*, Washington, DC, v. 30, n. 10, p. 327-341, Mar. 1991.
- CAMELO, H. N. *Estudo numérico do vento aracati para caracterização de seu potencial eólico*. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas) - Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2007.
- CARVALHO, P. C. M. *Geração Eólica*. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2003. 146 p.

Da SILVA, N. F.; ROSA, L. P.; ARAÚJO, M. R. The utilization of wind energy in the Brazilian electric sector's expansion. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. Colorado, v. 12, n. 2, p. 289-309, June 2005.

FONSECA, J. S. *Estatística aplicada*. São Paulo: Atlas, 1985. 272 p.

GÖKÇEK, M; Bayülken, A; Bekdemir, S. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Kırklareli, Turkey. *Renewable Energy*, Denver, v. 32, n. 10, p. 1739-1752, Jan. 2007.

JUSTUS, C. G. et al. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal Applied Meteorological*, Washington, DC, v. 17, n. 3, p. 350-353, Mar. 1978.

LUN, I. Y. F.; Lam, J. C. A study of Weibull parameters using long-term wind observations. *Renewable Energy*, Denver, v. 20, n. 2, p. 145-153, June, 2000.

MANWELL J. F.; MCGOWAN J. G.; ROGERS A. L. *Wind energy explained*. New York : Wiley, 2002. 569 p.

SEINFRAÇE. Disponível em: <<http://www.seinfrace.ce.gov.br/downloads/Atlas.zip>>. Acesso em: 27 abr. 2007.

STULL, R. *An Introduction to boundary layer meteorology*. Boston: Kluwer Academic, 1988. 666 p.

WEISSER, D. A wind energy analysis of Grenada: an estimation using the Weibull density function. *Renewable Energy*, Denver, v. 28, n. 11, p.1803-1812, 2003.

## SOBRE OS AUTORES

### **Henrique do Nascimento Camelo**

Licenciado em Física pela Universidade Estadual do Ceará (UECE) em 2005, M.Sc. em Ciências Físicas Aplicadas pela UECE em 2007. Atualmente é professor auxiliar de Física da Universidade Federal do Ceará (UFC), e também da Universidade Estadual do Ceará (UECE) da cidade de Iguatu.

### **Paulo Cesar Marques de Carvalho**

Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal do Ceará (UFC) em 1989, M.Sc. em Engenharia Elétrica pela UFPB em 1992, Dr. em Engenharia Elétrica pela Universidade de Paderborn - Alemanha em 1997. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFC, onde atua em nível de graduação e pós-graduação na área de geração de energia elétrica.

### **João Bosco Verçosa Leal Junior**

Bacharel em Física pela Universidade Federal do Ceará (UFC) em 1994, M.Sc. em Física pela UFC em 1997, Dr. em Física pela UFC em 2002. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto ao Departamento de Física da Universidade Estadual do Ceará (UECE), onde atua em nível de graduação e pós-graduação, tendo orientado dissertações de mestrado.

### **João Bosco Passos Accioly Filho**

Possui graduação em tecnologia em Mecatrônica, e atualmente é servidor público da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Depto. de Monitoramento Hidroambiental (DEPAM/FUNCEME), e aluno do Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas da Universidade Estadual do Ceará (UECE).