



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ**

**CURSO DE FÍSICA**

**RAFAEL ARAGÃO MAGALHÃES**

**APLICAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS PARA OBTENÇÃO DA  
DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA EM REGIÕES DO LITORAL CEARENSE.**

**FORTALEZA – CEARÁ**

**2009**

**RAFAEL ARAGÃO MAGALHÃES**

**APLICAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS PARA OBTENÇÃO DA  
DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA EM REGIÕES DO LITORAL CEARENSE.**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação Acadêmico de Física do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do grau de graduado em bacharel em Física.

Universidade Estadual do Ceará.

Orientador: Dr. Emerson Mariano da Silva.

**FORTALEZA – CEARÁ**

**2009**

M188a Magalhães, Rafael Aragão

Aplicação de distribuições estatísticas para obtenção da densidade de potência eólica em regiões do litoral cearense / Rafael Aragão Magalhães. – Fortaleza, 2009.

50p. ; il.

Orientador: Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva.

Monografia (Graduação em Física) – Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciência e Tecnologia.

1. Física. I. Universidade Estadual do Ceará, Centro de Ciência e Tecnologia.

CDD: 333.7

**RAFAEL ARAGÃO MAGALHÃES:**

Titulo do trabalho: APLICAÇÃO DE DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS PARA  
OBTENÇÃO DA DENSIDADE DE POTÊNCIA EÓLICA EM REGIÕES DO LITORAL  
CEARENSE.

Defesa em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Emerson Mariano da Silva.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

Orientador

---

Prof. Dr. Antônio Carlos Santana dos Santos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CEARÁ

---

Dr. José Maria Brabo Alves.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

(FUNCEME)

*Dedico esta monografia aos meus pais João Pedro e Mariana*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus, por me dar saúde, esperança, alegria e humildade, qualidades indispensáveis para conseguir caminhar na direção certa.*

*A toda a minha família, que sempre esteve presente nesta caminhada, em particular aos meus pais, João Pedro e Mariana.*

*A Universidade Estadual do Ceará, por intermédio do Departamento de Física, pela oportunidade de realizar este curso.*

*Ao Professor Dr. Emerson Mariano da Silva pela amizade, atenção, orientação e confiança demonstradas durante a realização deste trabalho e ao longo da minha iniciação científica.*

*A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), pelos dados usados nesse estudo.*

*Aos bolsistas de iniciação científica e mestrado do EOLUS que colaboraram com este trabalho.*

*Aos meus grandes amigos do Centro Acadêmico de Física (C.A.F.), pelos grandes momentos que jamais serão esquecidos.*

*Aos meus amigos de jornada, que entraram junto comigo neste curso, em especial ao Francisco José Lopes de Lima.*

*A Antônio Hemerson Ribeiro da Cruz pelos anos de convivência e paciência.*

## RESUMO

Apresenta-se nesse estudo, uma análise quantitativa dos regimes de vento observados, bem como a validação da metodologia de aplicação de distribuições estatísticas para a obtenção de ajustes de curva, aos dados de velocidade do vento, e da densidade de potência eólica, em regiões litorâneas do Estado do Ceará. Foram usados dados de velocidade e direção do vento, em superfície (10 metros), coletados pela rede de Plataformas de Coletas de Dados (PCDs) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), nos municípios de Acaraú e Barroquinha, região litoral oeste, e de Aquiraz e Icapuí, região litoral leste do Estado, no período de setembro de 2004 a agosto de 2005. Para o ajuste de curvas aos dados observados foram realizados testes com as distribuições de Weibull e Log-Normal. Os resultados mostraram que, em geral, para todas as regiões investigadas, se tem aumento da velocidade média do vento mensal do vento, no período chuvoso. Em adição, tem-se que a distribuição de Weibull apresenta melhor ajuste de curva, e conseqüentemente, pode ser usada para estimar a densidade de potência eólica nessas regiões, corroborando com hipóteses encontradas em estudos publicados na literatura especializada.

**Palavras-chave:** velocidade do vento, distribuição estatística, densidade de potência eólica.

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica.

CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos.

MW – Megawatt.

PCD – Plataforma de Coleta de Dados.

PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas.

Matlab – Matrix Laboratory



## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1 – Mapa do Estado do Ceará com destaque para os municípios de Acaraú, Aquiraz, Barroquinha e Icapuí. Regiões do litoral do Estado, onde estão localizadas as PCDs da FUNCEME.....	17
Figura 2 - Interface do software Windographer <sup>®</sup> , mostrando os perfis diários e mensais de variação da velocidade do vento, bem como um perfil vertical do mesmo, e uma rosa dos ventos, que mostra a distribuição de frequência de eventos predominante de direção do vento.....	25
Figura 3- Mostra a interface do software Matlab <sup>®</sup> .....	26
Figura 4 – Gráfico da velocidade média do vento á 10 metros da superfície em Acaraú, no período de setembro de 2004 à agosto de 2005.....	26
Figura 5 – Mapa da distribuição de frequência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, em Acaraú, obtido com o uso do software gráfico Windographer <sup>®</sup> .....	27
Figura 6 – Gráfico da variação do parâmetro de escala e forma para a distribuição de Weibull para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Acaraú.....	28
Figura 7 – Média e variância de X na distribuição Log-Normal para os dados de velocidade do vento observados na PCD de Acaraú.....	29
Figura 8 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Acaraú.....	29
Figura 9 – Densidade de potência eólica obtida através das distribuições de Weibull e Log-Normal e pelo método Máximo Teórico, para a PCD do município de Acaraú.....	30
Figura 10 – Diagrama de dispersão dos valores de densidade de potência eólica calculados pela distribuição de Weibull e distribuição Log-Normal em relação à densidade de potência eólica encontrada pelo método do máximo Teórico .....	31
Figura 11 – Gráfico da velocidade média do vento á 10 metros da superfície em Barroquinha, no período de setembro de 2004 à agosto de 2005.....	32
Figura 12 – Mapa da distribuição de frequência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, em Barroquinha, litoral oeste do Ceará.....	33
Figura 13 - Gráfico da variação do parâmetro de escala e forma para a distribuição de Weibull para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Barroquinha.....	33

Figura 14 – Valores mensais dos parâmetros (a) Média $E(X)$ e (b) variância $V(X)$ , da distribuição Log-Normal obtidos com os dados de velocidade do vento observados na PCD de Barroquinha.....	34
Figura 15 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Barroquinha.....	35
Figura 16 – Densidade de potência eólica obtida através da distribuição de Weibull e pelo método Máximo Teórico, para os dados de vento da PCD de Barroquinha.....	35
Figura 17 – Diagrama de dispersão da densidade de potência calculada pela distribuição de Weibull comparada com a densidade de potência calculada pelo Máximo Teórico.....	36
Figura 18 – Gráfico da velocidade média do vento, á 10 metros da superfície, em Aquiraz, no período de setembro de 2004 a agosto de 2005.....	37
Figura 19 – Mapa da distribuição de freqüência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, na região de Aquiraz, obtido com o uso do software gráfico Windographer® .....	37
Figura 20 – Gráfico da variação do parâmetro de escala e de forma para a distribuição de Weibull, obtidos para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Aquiraz.....	38
Figura 21 – Média $E(X)$ e variância $V(X)$ de $X$ na distribuição Log-Normal para os dados de velocidade do vento observados na PCD de Aquiraz.....	39
Figura 22 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Aquiraz.....	39
Figura 23 – Densidade de potência eólica obtida através da distribuição de Weibull e do método Máximo Teórico, para os dados de vento da PCD do município de Aquiraz.....	40
Figura 24 – Diagramas de dispersão dos valores de densidade de potência obtidos através da distribuição de Weibull e pelo método Máximo Teórico, para os dados da PCD de Aquiraz, litoral leste do Ceará.....	40
Figura 25 – Gráfico da velocidade média do vento, á 10 metros da superfície, em Icapuí, no período de setembro de 2004 à agosto de 2005.....	41
Figura 26 – Mapa da distribuição de freqüência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, na região de Icapuí obtido com o uso do software gráfico Windographer® .....	42
Figura 27 – Gráfico da variação do parâmetro de escala e forma para a distribuição de Weibull para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Icapuí.....	43
Figura 28 – Variação dos parâmetros, Média $E(X)$ e variância $V(X)$ , da distribuição Log-Normal para os dados de velocidade do vento observados na PCD de Icapuí.....	44
Figura 29 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Icapuí.....	44

Figura 30 - Densidade de potência eólica obtida através da distribuição de Weibull e do método Máximo teórico, para os dados de velocidade do vento obtidos na PCD do município de Icapuí.....45

Figura 31 – Diagrama de dispersão dos valores da densidade de potência eólica calculados pelas distribuições de Weibull e Log-Normal comparados com os valores da densidade de potência eólica calculados pelo método Máximo Teórico.....45

## SUMÁRIO

Lista de Siglas e Abreviaturas.....	7
Lista de Figuras e Tabelas.....	8
<b>1. Introdução.....</b>	<b>12</b>
<b>2. Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>13</b>
<b>3. Metodologia e Dados.....</b>	<b>17</b>
<b>4. Resultados.....</b>	<b>26</b>
<b>5. Conclusões.....</b>	<b>47</b>
<b>6. Referência Bibliográficas.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A energia eólica é a energia cinética contida nas massas de ar em movimento, seu aproveitamento para a geração de energia elétrica se dá por meio da aplicação do conceito físico da lei de conservação de energia, através da conversão da energia cinética de translação das massas de ar em energia de rotação, que juntamente com o emprego de turbinas, é transformada em energia elétrica para uso comercial.

O Estado do Ceará atualmente desponta no cenário nacional como o pioneiro na instalação de parques eólicos para a geração de energia elétrica, devido ao seu grande potencial de ventos favoráveis para o aproveitamento na geração de energia. No entanto, a inserção da energia eólica na matriz energética regional ainda é discreta. Especialistas apontam que para que isso aconteça de forma plena é necessário o aprofundamento das investigações sobre os regimes de vento, e conseqüentemente, sobre a quantificação dos recursos eólicos nos potenciais sítios eólicos de uma determinada região (Dutra *et al.*, 2004; Cunha 2008).

Neste contexto, encontra-se na literatura que o desafio dos estudos realizados à quantificação dos recursos eólicos e da potência elétrica gerada pelos ventos em uma determinada região, se concentra no problema do ajuste de curvas e na aplicação de distribuição de distribuições estatísticas aos dados de velocidade do vento observados na região (Hennessey, 1977; Justus *et al.*, 1978; Sansigolo, 2005).

Em adição, menciona-se que os resultados destes estudos também indicam que a distribuição de Weibull é a que melhor se ajusta aos dados observados de velocidade do vento nas diversas regiões pesquisadas. Assim, constatou-se que pouca atenção foi dada ao problema do ajuste de curva, e para a quantificação da densidade de potência eólica, usando-se outras distribuições estatísticas.

Desta foram, o objetivo deste trabalho é investigar o comportamento dos regimes de vento, bem como obter ajustes de curvas, através da aplicação de distribuições estatísticas (Weibull e Log-Normal) aos dados de velocidade do vento observados e a densidade de potência eólica associada a esses, em regiões litorâneas do Estado do Ceará, particularmente nos municípios de Acaraú e Barroquinha, região litoral oeste, e de Aquiraz e Icapuí, região litoral leste do Estado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Estudos relacionados ao uso de distribuições estatísticas para obtenção da densidade de potência eólica.

Dentre os estudos pioneiros que apresentam a busca por um ajuste de curva aos dados observados de velocidade do vento, bem como para o cálculo da densidade de potencial eólico destacam-se Hennessey (1977 e 1978) e Justus *et al.* (1978). Estes aplicaram a distribuição de Weibull para obtenção de um ajuste de curva para os dados observados de velocidade do vento em mais de uma centena de localidades nos Estados Unidos, ocasião em que concluíram que essa distribuição estatística proporcionou um satisfatório ajuste de curva aos dados de distribuição de frequência da velocidade do vento observados na região.

Adicionalmente, usando-se esse mesmo conjunto de dados de velocidade do vento, Hennessey (1978) realizou um estudo em que comparava o desempenho das distribuições estatísticas de Weibull e Rayleigh para um ajuste de curvas a esses dados observados. Dessa forma, concluiu que o erro máximo esperado, obtido com o uso da distribuição de Rayleigh, em comparação com a de Weibull, é tolerável e, assim, menciona que a distribuição estatística de Rayleigh também pode ser usada para realização de ajustes de curva, bem como para obtenção de densidade de potencial eólico em determinadas regiões.

Seguindo o proposto pelos autores supracitados, ainda no final do século XX, encontram-se na literatura alguns estudos realizados em que se tem o uso dessas distribuições estatísticas para realização de ajustes de curvas e para obtenção da densidade de potência eólica em algumas regiões brasileiras.

Sucharov *et al.* (1990) realizaram o cálculo dos parâmetros de escala e de forma da distribuição de Weibull para dez localidades do Estado do Rio de Janeiro, a partir de três observações diárias, em que se registrava a velocidade do vento. Os resultados mostraram que a distribuição estatística de Weibull descreveu adequadamente as distribuições observadas da velocidade do vento nos locais investigados, corroborando com os pioneiros estudos que fizeram uso dessa técnica.

Macêdo (1996), também usou a distribuição estatística de Weibull, conforme citada anteriormente, para obtenção da densidade de potência eólica na região do município de Boquim no Estado de Sergipe. Assim, realizou um ajuste de curva dessa distribuição

estatística a uma série de médias diárias de velocidade do vento, à 10 metros de altura, obtidas na estação meteorológica da região.

Vieira (1998) propõe que para o cálculo da densidade de potencial eólico de uma determinada região, sejam testados ajustes de curva dos dados observados de velocidade do vento com as funções de densidade de probabilidade beta, gama incompleta e normal. Assim, menciona que a caracterização do potencial eólico baseada nessa metodologia, que se mostrou mais criteriosa que os demais procedimentos utilizados por pesquisadores anteriormente citados, visto que utiliza uma série de valores estimados em diversos níveis de probabilidade de ocorrência, apresenta maior confiabilidade para o uso comercial.

Sansigolo (2005) visando à determinação do potencial eólico mensal e anual em Panorama no Estado de São Paulo, investigou o uso das distribuições estatísticas de Weibull, Log-Normal e Beta, que serviram também para testar a obtenção dos ajustes de curva aos dados observados de velocidade do vento e calculados, velocidade cúbica do vento, no período entre os anos 2000 e 2002.

Assim, foram realizadas avaliações comparativas dos ajustes, com os parâmetros das distribuições obtidos pelo método da máxima verossimilhança, usando os testes qui-quadrado e de Kolmogorov-Smirnov, além de gráficos das probabilidades acumuladas teóricas e empíricas e dos percentis.

Os resultados obtidos mostraram que as distribuições de Weibull e Log-Normal foram as que melhor se ajustaram aos conjuntos dados de velocidade e velocidade cúbica do vento, indicando que essas distribuições seriam melhores usadas para obtenção de densidade de potência eólica na região em estudo. Adicionalmente, mostrou que as estimativas de potência eólica, obtidas a partir dos ajustes de curva usando a distribuição Log-Normal foram sistematicamente superiores ( $\approx 40\%$ ) às obtidas usando-se a distribuição de Weibull.

Particularmente para a região nordeste do Brasil, encontra-se em Silva (2002), a utilização da distribuição de Weibull para a determinação da densidade de potência eólica em regiões do Estado da Bahia. Nesse estudo foram usados dados observados de velocidade e direção do vento, em 22 localidades, no período de janeiro de 1977 a dezembro de 1981.

Adicionalmente, para o Estado do Ceará mencionam-se os estudos publicados por Lima (2008), em que se tem a apresentação da avaliação da aplicação de distribuição de probabilidade de Weibull, de Rayleigh e Log-Normal, aos dados observados de velocidade do vento, obtidos pela rede de Plataforma de Coleta de Dados (PCD) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), no município de Jaguaruana, nos anos de 2004 e 2005.

Os resultados obtidos nesse estudo mostraram que a distribuição de Weibull foi a que melhor se ajustou a tarefa de estimar a densidade de potência eólica nessa região, quando comparada com os dados obtidos pelo método do Máximo Teórico. As distribuições de Rayleigh e a de Log-Normal não obtiveram desempenho satisfatório nessa tarefa para essa região em estudo.

## **2.2 A energia eólica no mundo.**

As primeiras tentativas para a geração de eletricidade através da conversão da energia contida nos ventos surgiram no final do século XIX, porém, só depois da crise internacional do petróleo, na década de setenta, é que houve interesse por parte da sociedade e investimentos empresariais suficientes para o desenvolvimento e a aplicação de equipamentos aerogeradores em escalas comerciais (ANEEL, 2006).

A utilização da energia eólica no mundo para a produção de eletricidade em larga escala vem sendo cada vez mais difundida em diversos países de todos os continentes. Iniciada em países da Europa, principalmente na Alemanha, na Dinamarca e na Holanda, e também nos Estados Unidos, a energia eólica está hoje presente em vários outros países, como por exemplo, na Espanha, em Portugal, Itália e Bélgica, bem como apresenta uma crescente penetração em países das Américas, e particularmente da América Latina, África e Ásia (Dutra *et al.*, 2004).

Em 2008 registrou-se a capacidade total instalada no mundo de 121.188 MW, o que equivale a 1,5% a energia elétrica consumida no mundo (Fonte: World Wind Energy Stats, 2008).

Nesse contexto, menciona-se que a indústria eólica europeia tem se mostrado como uma das mais promissoras e prósperas no mundo. Uma área rural escassamente povoada, combinada com políticas fortes de governo, fez desse continente uma excelente oportunidade tanto para fabricantes como para investidores e empreendimentos dessa natureza.



Os Estados Unidos consiste em mercado de energia em expansão, após uma reduzida taxa de instalação nos anos 90, em 2008 passaram a se tornar o número um do mercado de energia eólica, com capacidade total instalada de 25.170 MW.

No continente asiático, tem-se que a Índia apresenta uma capacidade instalada de mais de 9.587 MW, sendo já o quinto maior parque gerador de energia eólica do mundo. A China que vem duplicando sua capacidade de geração de energia eólica instalada pelos últimos quatro anos, alcançando a marca de 12.210MW, ocupando o quarto lugar no mundo em potência eólica total instalada.

Segundo Lopes *et al.* (2004), o Brasil possui um dos maiores potenciais para aproveitamento da energia eólica em todo o mundo, já comprovado pelas medições anemométricas em curso em diversos estados e pelo Atlas Eólico Brasileiro, este evidência que o potencial eólico brasileiro pode ser aproveitado em escala comercial. No entanto, segundo Marcondes *et al.* (2008) tal potencial de geração ainda aparece discretamente na matriz energética nacional.

Dentro desse potencial brasileiro está a Região Nordeste do Brasil, e particularmente o Estado do Ceará, que desponta como uma das pioneiras na instalação de energia eólica devido ao seu grande potencial de ventos favoráveis para o aproveitamento na geração de energia elétrica (Dutra *et al.*,2004).

Em adição, mencionam-se nessa primeira década do século XXI, o Ceará é o estado brasileiro que receberá maior volume de investimentos na área de geração de energia eólica, recursos proveniente de usinas contratadas no âmbito do PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas. A potência de geração a ser instalada no Estado equivale a 488,04 MW, pouco mais de um terço do valor global do PROINFA, alocado para investimentos em geração de energia eólica previsto para todo o País.

### **3. METODOLOGIA E DADOS**

#### **3.1 Análise dos dados de velocidade do vento e área em estudo**

Nesse estudo foram usados dados horários de velocidade e direção do vento, no período de setembro de 2004 a agosto de 2005, proveniente das Plataformas de Coleta de Dados (PCDs) da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), localizada no município de Acaraú, Aquiraz, Barroquinha e Icapuí. Localizadas em regiões litorâneas do Estado do Ceará, como mostrado no mapa da Figura 1. As regiões investigadas foram escolhidas devido à distribuição geográfica e a disponibilidade de dados observados, no entanto, a carência e a inconsistência de dados de outras estações localizadas no litoral do Estado do Ceará impediram que nesse estudo fossem investigadas outras regiões.

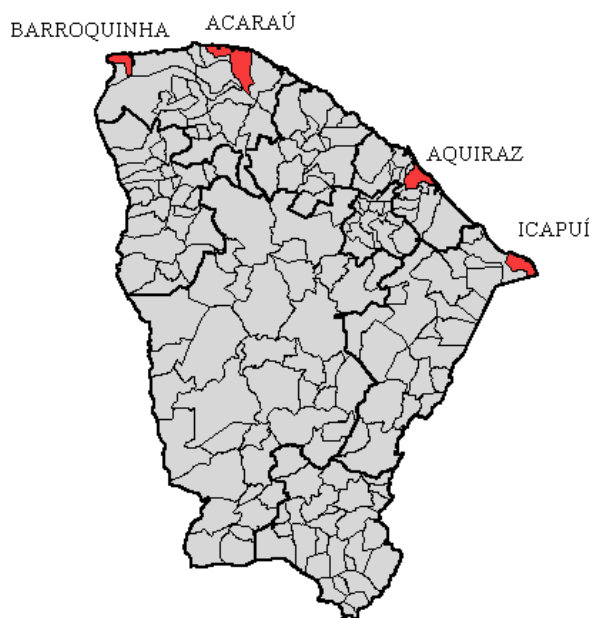


Figura 1 – Mapa do Estado do Ceará com destaque para os municípios de Acaraú, Aquiraz, Barroquinha e Icapuí. Regiões do litoral do Estado, onde estão localizadas as PCDs da FUNCEME.

A metodologia usada baseia-se em análise estatística descritiva e aplicação das distribuições de Weibull e Log-Normal para obtenção de um ajuste de curva e, posteriormente, para obtenção da densidade de potência eólica, usando-se os dados horários de velocidade e direção do vento coletados nas regiões supracitadas.

A análise estatística dos dados de velocidade e direção dos ventos coletados nas PCDs das regiões em estudo foi realizada pelas ferramentas do pacote Windographer® (Tom Lambert, 2008) e com as ferramentas do pacote Matlab® (Jones, 1997), foram calculados os parâmetros para as duas distribuições estatísticas. Assim, a partir dos parâmetros das distribuições de Weibull e Log-Normal foram calculadas as densidades de potência eólica nessas regiões.

### 3.2 Estatística descritiva: Média, desvio padrão e variância.

A média aritmética é usada para definir o centro de uma distribuição, também é a medida mais comum de tendência central determinada segundo uma regra estabelecida que se utiliza para representar todos os valores da distribuição. Desta forma, seja  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , uma amostra de  $n$  observações, a sua média  $\bar{X}$  se obtém somando-se os elementos da amostra e dividindo a soma pelo tamanho  $n$  da amostra. Assim, pode-se escrever uma expressão matemática que represente a média, na forma:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i .$$

Outra medida muito importante para a estatística descritiva e o grau de dispersão das observações, obtido através do cálculo do desvio padrão, que é a medida mais comum da dispersão na Estatística. Da definição, encontra-se que o desvio-padrão é dado pela raiz quadrada da variância, outra medida de dispersão usada em estudos estatísticos.

A variância é definida por:

$$\sigma^2 \equiv \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 .$$

O desvio padrão como:

$$\sigma \equiv \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} .$$

### 3.3 A distribuição de Weibull

Segundo Moura *et al.* (2006), a família da distribuição de Weibull foi apresentada pelo físico sueco Waloddi Weibull, em 1939, mas somente em artigo publicado em 1951 é que forma apresentadas diversas aplicações para essas distribuições. No entanto, o autor menciona que a aplicabilidade dessa teoria estatística no campo da engenharia é mais recente.

Segundo estudos já citados anteriormente a distribuição estatística de Weibull permite representar a distribuição de frequência de velocidade do vento de uma forma simples e compacta, tal como a equação (4) que é mostrada abaixo, onde se tem uma distribuição de Weibull de dois parâmetros.

$$f(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k},$$

em que,  $f(v)$  é a frequência de ocorrência da variável velocidade de vento  $v$ , que nesse estudo é medida em metros por segundo ( $\frac{m}{s}$ );  $k$  é o parâmetro de forma e  $c$  é o parâmetro de escala da distribuição.

Encontra-se na literatura que o fator  $k$  é o fator adimensional de forma da distribuição de Weibull, e representa uma medida inversa da oscilação da velocidade do vento em torno de sua velocidade média, portanto, será uma medida inversa do nível de turbulência, que por sua vez é definida como sendo a relação entre o desvio padrão e a velocidade média. Assim, quando a velocidade do vento for constante a turbulência será pequena, resultando um grande valor de  $k$ . Já para um comportamento variável da velocidade do vento, resulta em um valor de  $k$  pequeno e conseqüentemente em alta turbulência (LIMA, 2008).

Em adição, encontra-se que o fator  $c$  representa o fator de escala da distribuição de Weibull, dado em unidades de medida da velocidade do vento. Esse representa a diversidade de ocorrências de velocidade de vento na distribuição de Weibull e está associado com a velocidade média da distribuição. Assim, os meses que apresentam os maiores fatores de escala, são os que apresentam as velocidades do vento mais altas (Moura *et al.*, 2006).

A função de densidade de probabilidade acumulada associada a essa distribuição é dada por:

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

De acordo com Silva *et al.* (2002), os momentos de primeira [ $E(x)$ ] e segunda [ $S^2$ ] ordens, centrados na origem, para a distribuição de Weibull são dados respectivamente, por:

$$E(v) = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

e,

$$E(v^2) = c^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right).$$

### 3.4 A distribuição Log-Normal

A distribuição Log-Normal é uma distribuição de probabilidade contínua usada na representação de grandezas positivas, é frequentemente usada em modelagem estatística de fenômenos metrológicos. Ao contrário do que o nome indica, não significa a densidade do logaritmo de uma variável normal, pois uma variável normal admite valores negativos, valores em que a função logaritmo não é definida. Uma variável aleatória com distribuição Log-normal é encontrada tomando-se a exponencial de uma variável aleatória normal.

Assim, encontra-se na literatura que a função de densidade de probabilidade da distribuição Log-normal é dada, por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_y} \sqrt{2\pi} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right].$$

E a função densidade de probabilidade acumulada  $F(x)$  associada a essa distribuição é dada por:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma_y} \sqrt{2\pi} \lim_{x \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^x \exp - \left[ \left( \frac{(\ln x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2} \right) \right] dx ,$$

em que  $\mu_y$  é o parâmetro de posição ou a média dos logaritmos naturais de  $x$ ,  $\sigma_y$  é o parâmetro de escala ou desvio padrão dos logaritmos naturais de  $e$ ,  $x$  é a velocidade do vento (m/s).

Os seus momentos  $\mu_1$  e  $\mu_2$  dessa distribuição são dados por:

$$\mu_1 = E(X) = X = \exp \left( \mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2} \right)$$

e,

$$\mu_2 = V X = \left[ \exp(\sigma_y^2) - 1 \right] \exp(2\mu_y + \sigma_y^2)$$

### 3.5 Densidade de potência eólica

Para estimar a densidade de potência eólica, os dados foram agrupados em doze conjuntos mensais e ajustados pelas distribuições estatísticas de Weibull e Log-Normal, onde foram calculados os parâmetros de escala e de forma, para a distribuição de Weibull, e os parâmetros de posição e de escala, para a distribuição Log-Normal. Após tal ajuste de curva, calculou-se a densidade de potência eólica usando os parâmetros das distribuições e para

efeito de comparação, também se calculou a densidade de potência eólica usando-se o método, denominado na literatura, de Máximo Teórico, descrito abaixo.

Assim, o método de Máximo Teórico define a densidade de potência eólica ( $P$ ) associada ao fluxo do vento, denominado de fluxo eólico, através de uma unidade de área, por:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3,$$

em que,  $\rho$  é a densidade do ar, a qual considerou-se nesse estudo como sendo a massa específica do ar úmido, cujo seu valor é descrito em Silva *et al.* (2002), que é de  $\rho = 1,6 \frac{kg}{m^3}$ , e  $v^3$  é a velocidade do vento, dada em metros por segundo ( $\frac{m}{s}$ ) elevada a terceira potência.

A densidade de potência eólica ( $P$ ) obtida a partir da distribuição de Weibull é computada a partir dos parâmetros ( $k$  e  $c$ ) calculados para a velocidade do vento, dada por:

$$P = \frac{\rho}{2} E(x^3)$$

onde,

$$E(x^3) = c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right),$$

que representa o momento de terceira ordem associada a essa distribuição estatística, e  $\Gamma$  é a função matemática gama.

A densidade potência eólica associada à função Log-normal foi obtida a partir dos parâmetros calculados para velocidades do vento com esta função. Assim,

$$P = \frac{\rho}{2} E(x^3),$$

onde,

$$E(x^3) = \exp\left(3\mu_y + \frac{9\sigma_y^2}{2}\right),$$

que representa o momento de terceira ordem associada a essa distribuição estatística.

Assim, menciona-se que, de acordo com Sansigolo (2005), a distribuição de Weibull e a distribuição Log-Normal compartilham a propriedade de que o cubo de uma variável aleatória também é uma variável aleatória.

### **3.6 O software Windographer®**

Windographer® é um software gráfico desenvolvido por Mistaya Engenharia INC. Um programa para análise dos dados de vento que tem por objetivo auxiliar nos estudos relacionados a definição das características do regime observado de vento de uma determinada região e, conseqüentemente, na quantificação dos recursos eólicos dessa região.

O programa é versátil e possui a capacidade de leitura de arquivos de dados do vento gerados por outros programas de computador ou arquivos de dados observados em estações meteorológicas de superfície, tais como PCDs. Pode exibir diversos gráficos e tabelas, como mostrado na Figura 2, para que analistas e ou pesquisadores usuários possam avaliar tanto as características de variabilidade do regime de vento, quanto a quantidade dos recursos eólicos observados numa região.



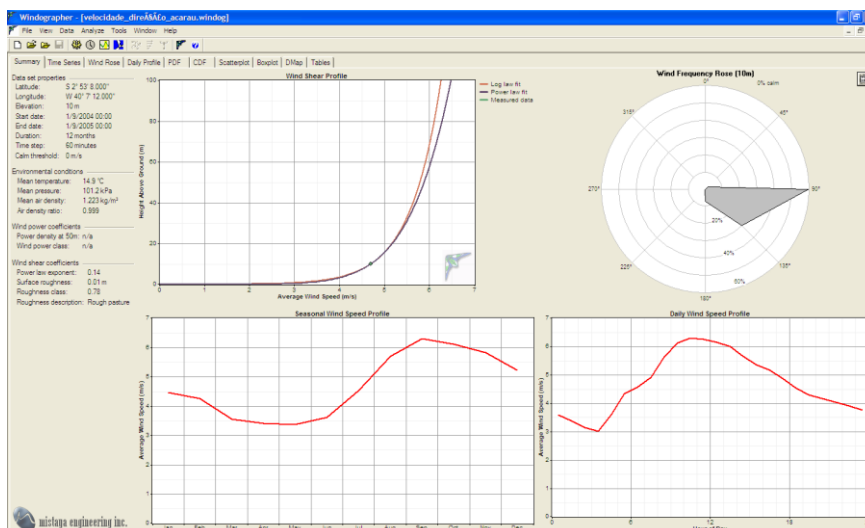


Figura 2 - Interface do software Windographer<sup>®</sup>, mostrando os perfis diários e mensais de variação da velocidade do vento, bem como um perfil vertical do mesmo, e uma rosa dos ventos, que mostra a distribuição de frequência de eventos predominante de direção do vento.

### 3.7 O software Matlab<sup>®</sup>

O Matlab<sup>®</sup>, que vem da abreviatura de Matrix Laboratory, ou como tradução livre, Laboratório de Matrizes, é um programa de computador de uso específico, que tem por objetivos aperfeiçoar a execução de cálculos matemáticos científicos em diversas áreas do conhecimento, dentre elas as ciências naturais e exatas e a engenharia.

Foi desenvolvido inicialmente como um programa para operações matemáticas sobre matrizes, mas ao longo dos anos transformou-se em um sistema computacional flexível capaz de resolver essencialmente qualquer problema teórico.

O software Matlab<sup>®</sup> implementa a linguagem matlab, e oferece uma ampla biblioteca de funções predefinidas para que a programação técnica se torne mais fácil e eficiente. Assim, menciona-se que essa variedade extremamente ampla de funções torna muito fácil resolver problemas técnicos com o Matlab<sup>®</sup>, em comparação ao uso de outras linguagens de programação, tais como, o Fortran<sup>®</sup> e o C<sup>®</sup>. Na Figura 3, abaixo, tem-se um exemplo da interface desse software.

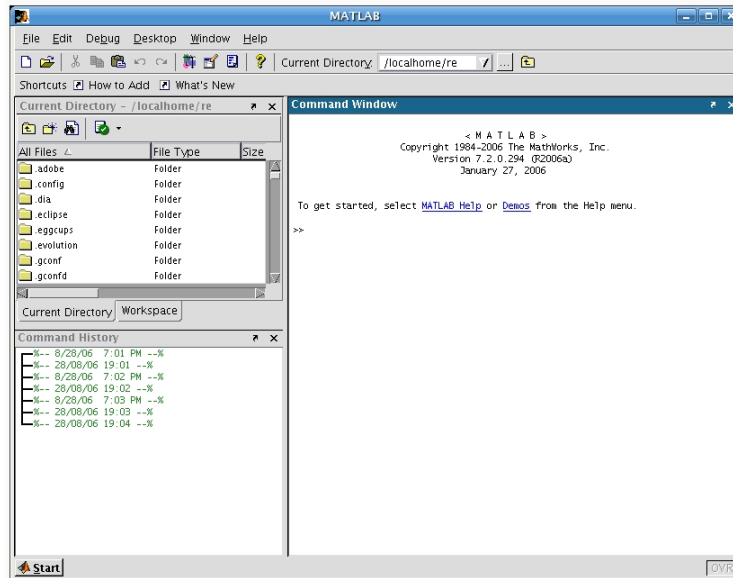


Figura 3- Interface do software Matlab<sup>®</sup>.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análises para a os dados de vento observados na PCD do município de Acaraú (litoral oeste do Ceará)

Encontra-se na Figura 4, a evolução dos valores da velocidade média do vento ao longo dos meses dos de 2004 e 2005, obtidos na PCD de Acaraú, região litoral oeste do Estado do Ceará.

Os resultados obtidos mostram que a média anual da velocidade do vento na região é de aproximadamente 4,7 m/s. Em adição, menciona-se que em geral, nessa região se tem aumento relativo dos da velocidade média do vento nos meses de junho a janeiro, meses correspondentes à estação seca nessa região, onde as reservas das hidrelétricas estão mais comprometidas (Silva *et al.*,2007).

Adicionalmente, observa-se que nos meses da estação chuvosa, onde se tem maior disponibilidade de água para geração de energia hidroelétrica, que vai de fevereiro a maio nessa região, ocorre uma diminuição nos valores da velocidade média do vento, concordando com a hipótese de complementaridade exposta na literatura (Atlas Eólico do Ceará, disponível no site: [www.seinfra.ce.gov.br](http://www.seinfra.ce.gov.br)).

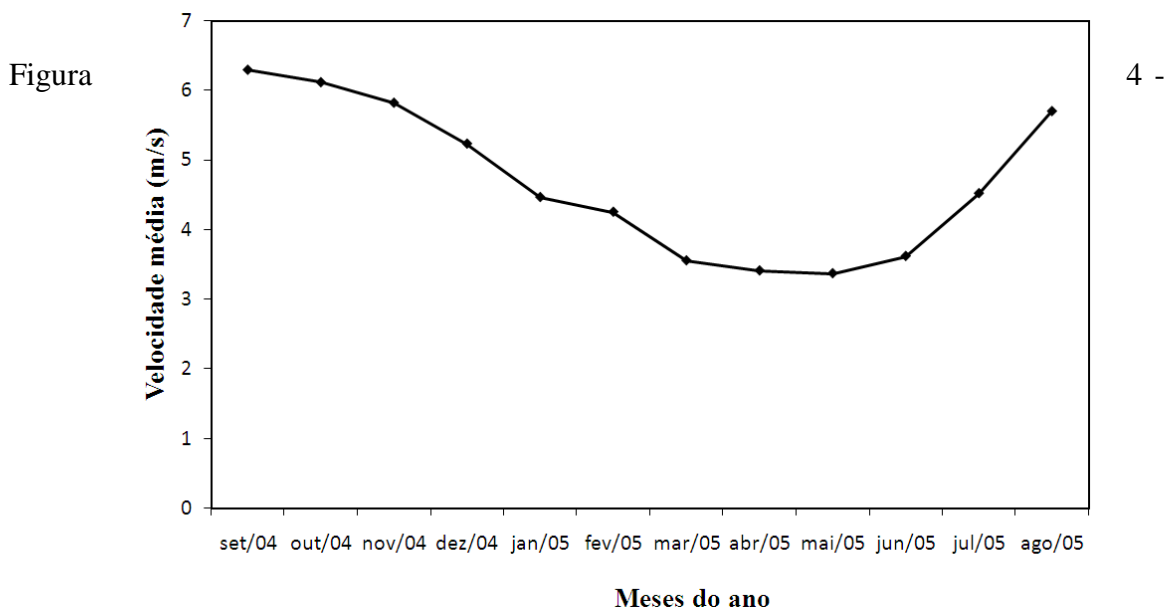


Gráfico da velocidade média mensal do vento, á 10 metros da superfície, obtido na PCD de Acaraú, no período de setembro de 2004 à agosto de 2005.

Menciona-se que o maior aproveitamento de uma turbina eólica se da quando o vento incide de forma frontal sobre a mesma (Batista, 2008) e por este motivo é importante o estudo da direção do vento. Assim, analisando o gráfico polar da direção do vento, mostrado na Figura 5, observa-se que a direção do vento permanece aproximadamente constante, de

leste e sudeste, ao longo do ano. Este fato é um bom indicativo para o aproveitamento do potencial deste vento para a geração de energia eólica na região.

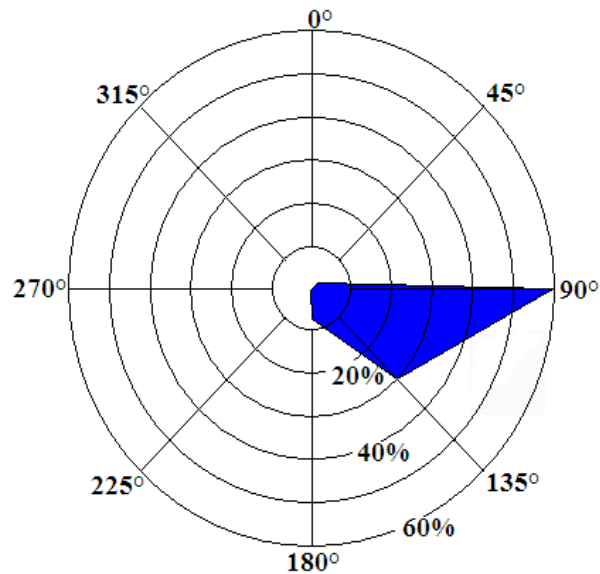


Figura 5 – Mapa da distribuição de frequência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, na região de Acaraú, obtido com o uso do software gráfico Windographer®.

A Figura 6 mostra a variação mensal dos valores dos parâmetros de forma e de escala da distribuição de Weibull, obtidos para a os dados de velocidade do vento da PCD de Acaraú.

Menciona-se que o parâmetro de forma ( $k$ ), esta relacionado de forma inversa com o desvio padrão da distribuição. Sendo assim, valores altos de  $k$  indicam pouca mudança na intensidade do vento. O parâmetro de escala ( $c$ ), esta relacionado com a média da velocidade do vento.

Os resultados apresentados na Figura 6, abaixo, mostram que a variação mensal dos parâmetros da distribuição de Weibull representa de forma satisfatória a variação dos dados de velocidade média mensal do vento observados na PCD de Acaraú. Tendo-se maiores valores do parâmetro de escala nos meses considerados secos e menores valores nos meses considerados chuvosos, concordando com o observado para a velocidade do vento nessa região.

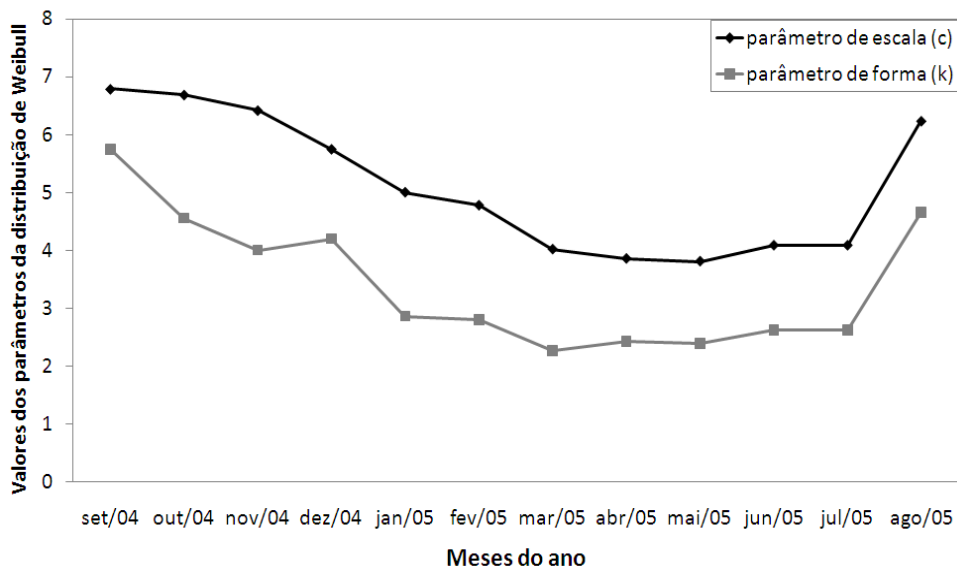


Figura 6 - Gráfico da variação do parâmetro de escala e de forma para a distribuição de Weibull obtidos através dos dados de velocidade do vento observado na PCD de Acaraú.

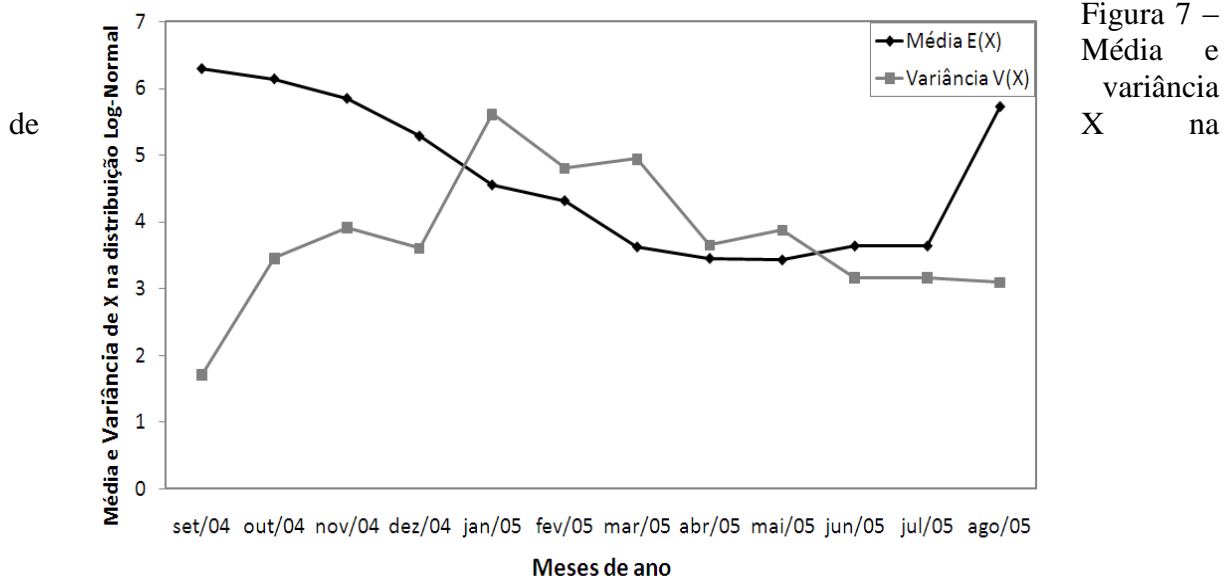
Em adição, analisando-se os parâmetros obtidos para a distribuição estatística Log-Normal, tem-se na Figura 7 a variação mensal dos valores de  $E(X)$ , que esta relacionada com a velocidade média do vento, assim, maiores valores de  $E(X)$  implicam em maiores valores de velocidade média do vento.

Observa-se, na figura supracitada que os valores de  $E(X)$  aumentam nos meses denominados secos, e diminuem nos meses considerados chuvosos, concordando com a variação dos valores de velocidade média do vento observados na região.

Adicionalmente, observa-se nessa figura, a variância  $V(X)$ , que esta relacionada com a dispersão dos valores da velocidade do vento, assim, maiores valores de  $V(X)$  indicam grandes variações nos valores das intensidades do vento.

Os resultados, mostrados na Figura 7, abaixo, mostram que para  $V(X)$  não é possível estabelecer um padrão de variação semelhante ao encontrado para média  $E(X)$ , e para a variação dos parâmetros da distribuição de Weibull. No entanto, menciona-se que os maiores valores de variância ocorrem nos meses correspondentes a estação chuvosa da região.

Assim, menciona-se que os resultados dos parâmetros encontrados para a distribuição de Weibull devem apresentar melhor ajuste de curva aos dados de velocidade do vento observados nessa região, como mostrado na Figura 8, que concorda com o proposto nos estudos citados anteriormente.



distribuição Log-Normal para os dados de velocidade do vento observados na PCD de Acaraú.

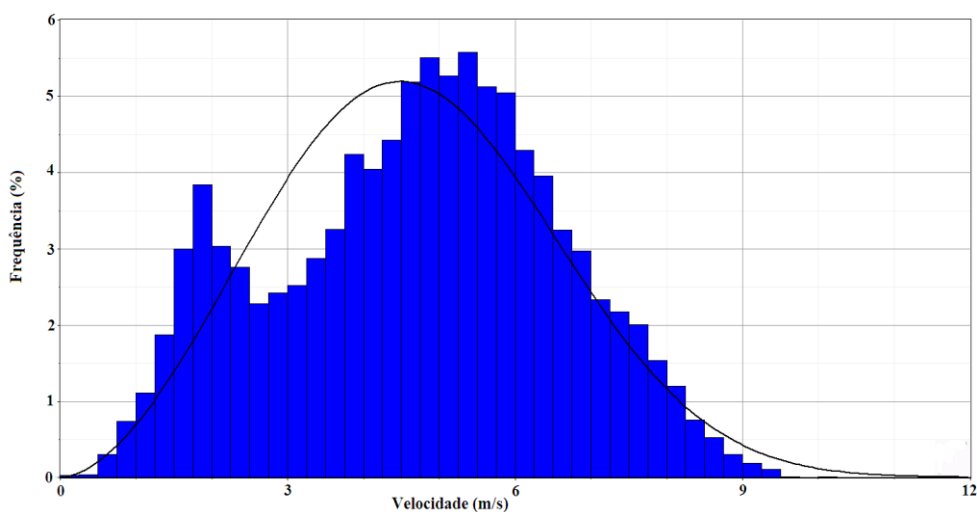


Figura 8 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Acaraú.

A Figura 9 mostra a distribuição dos valores de densidade de potência eólica obtidos através das distribuições estatísticas de Weibull e Log-Normal e pelo método Máximo

teórico, que considera a densidade de potência eólica como função da densidade do ar e da velocidade do vento elevada a terceira potência.

Os resultados mostram que, com a distribuição de Weibull se encontra uma faixa de variação dos valores de potência eólica que vai de  $36,3 \text{ W/m}^2$  em maio de 2005 a  $161,1 \text{ W/m}^2$  em setembro de 2004. Com a distribuição Log-Normal encontram-se valores que variam entre  $53,3 \text{ W/m}^2$  em junho de 2005 e  $140,4 \text{ W/m}^2$  em outubro de 2004.

Adicionalmente, menciona-se que é possível se observar, na Figura 9, que as curvas referentes aos valores, obtidos pela distribuição de Weibull e pelo método de Máximo Teórico se ajustam, concordando com o proposto na literatura. Observa-se uma inconsistência de dados para o mês de julho de 2005.

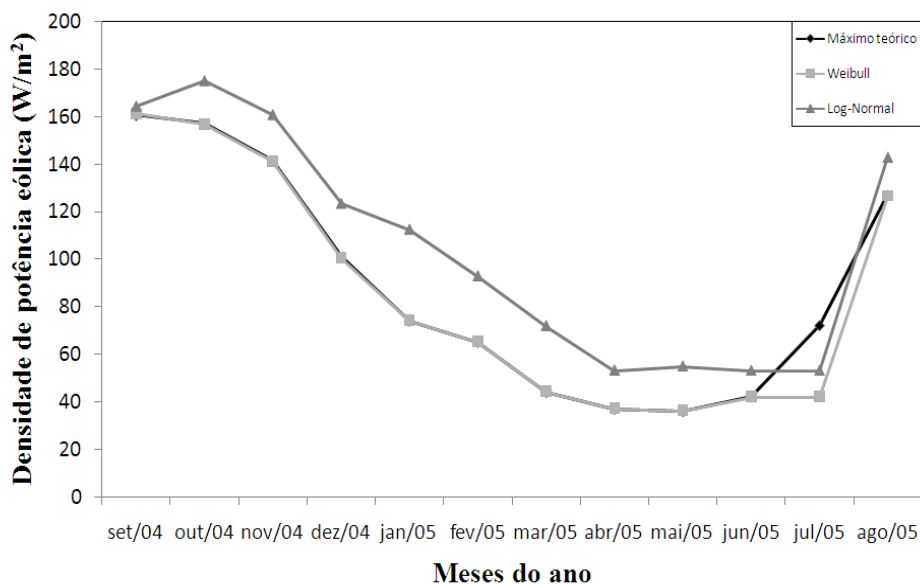


Figura 9 – Densidade de potência eólica obtida através das distribuições de Weibull e Log-Normal e pelo método Máximo Teórico, para a região da PCD do município de Acaraú.

Na Figura 10, tem se um diagrama de dispersão dos valores de densidade de potência eólica calculada através da distribuição de Weibull, da distribuição Log-Normal, comparados com os valores calculados pelo método do Máximo teórico.

Os resultados mostram altos valores do coeficiente de correlação estatística, que segundo Devore (2006) representa forte correlação entre as séries de valores obtidas pelas distribuições estatísticas e os obtidos pelo método Máximo teórico. Ressalta-se, ainda, que se

tem maior correlação entre os valores obtidos pela distribuição de Weibull e os obtidos pelo método de Máximo Teórico, concordando com o mostrado na análise dos resultados mostrados na Figura 9.

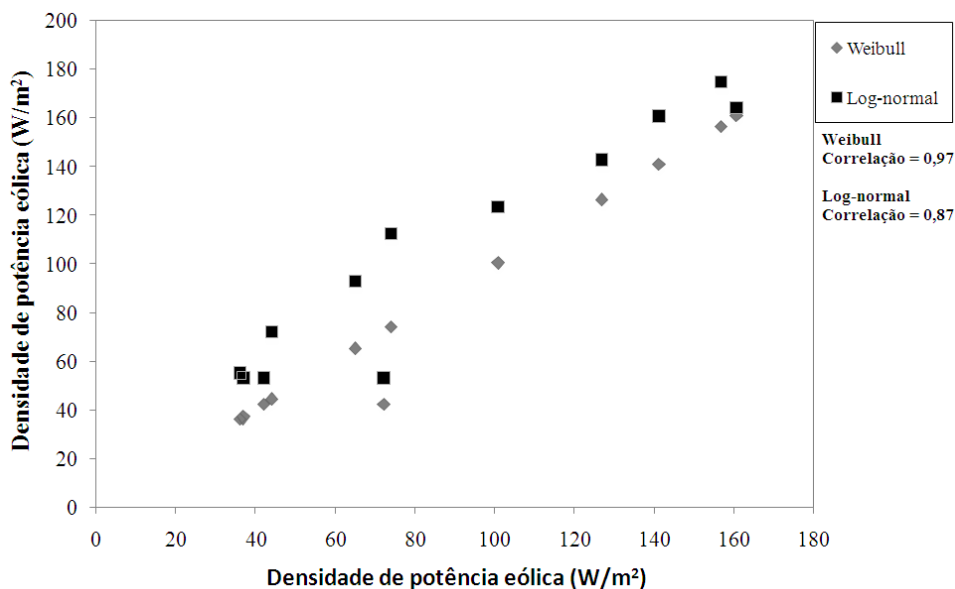


Figura 10 – Diagrama de dispersão dos valores de densidade de potência eólica calculados pela distribuição de Weibull e distribuição Log-Normal em relação à densidade de potência eólica encontrada pelo método do máximo Teórico.

#### 4.2 Análise para os dados de vento observados na PCD do município de Barroquinha (litoral oeste do Ceará)

Encontra-se na Figura 11, a evolução dos valores da velocidade média mensal do vento ao longo dos meses de 2004 a 2005, obtidos na PCD da cidade de Barroquinha, região do litoral oeste do Estado do Ceará.

A média anual da velocidade do vento em Barroquinha é de aproximadamente 3,8 m/s e, em geral, tem-se aumento relativo dos valores da velocidade média do vento nos meses que fazem parte da estação seca dessa região, que vai de junho a janeiro, segundo Silva *et al.*(2007). Nos meses da chuvosa, de fevereiro a maio, tem-se uma diminuição nos valores da velocidade média do vento, concordando, assim, com a hipótese de complementaridade, já mencionada anteriormente, exposta na literatura.



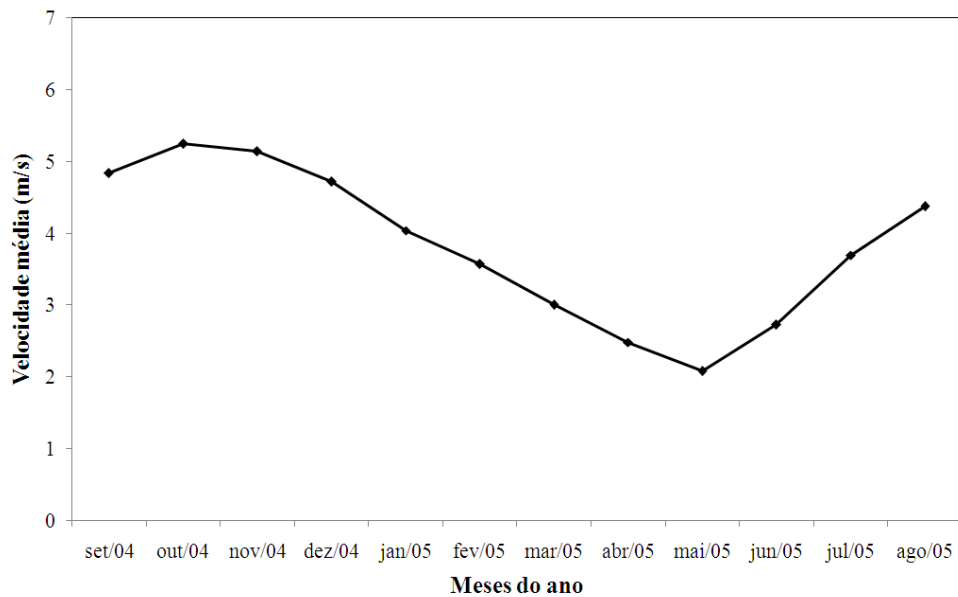


Gráfico da velocidade média do vento á 10 metros da superfície em Barroquinha, no período de setembro de 2004 à agosto de 2005.

Analisando-se da direção predominante do vento, mostrada no gráfico polar da Figura 12, observa-se que a direção predominante do vento nessa região é de leste, apesar de se ter uma variação ao longo do ano, com eventos de sudeste a nordeste. Fato que indica que esse regime de vento apresenta potencial para geração de energia eólica na região (Batista, 2008).

A Figura 13 mostra a variação mensal dos valores dos parâmetros da distribuição de Weibull, para a os dados de velocidade do vento na PCD de Barroquinha. Os resultados mostram que, em geral, se encontram maiores valores nos meses considerados secos e menores valores para os meses que correspondem à estação chuvosa da região, concordando com o perfil de velocidade média do vento observado na região.

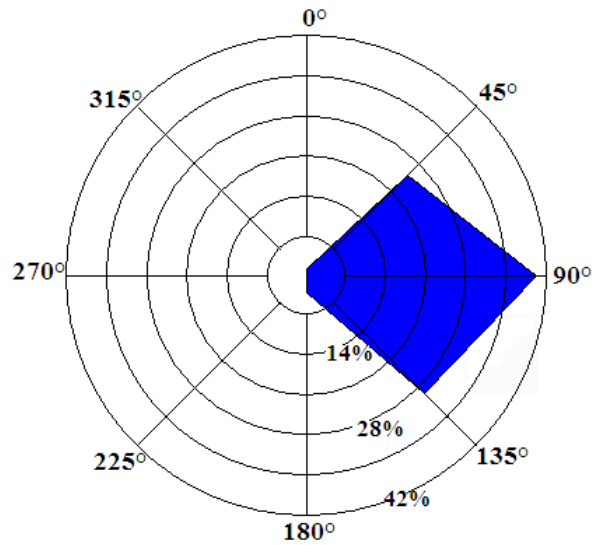


Figura 12 – Mapa da distribuição de frequência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, na região de Barroquinha, litoral oeste do Ceará.

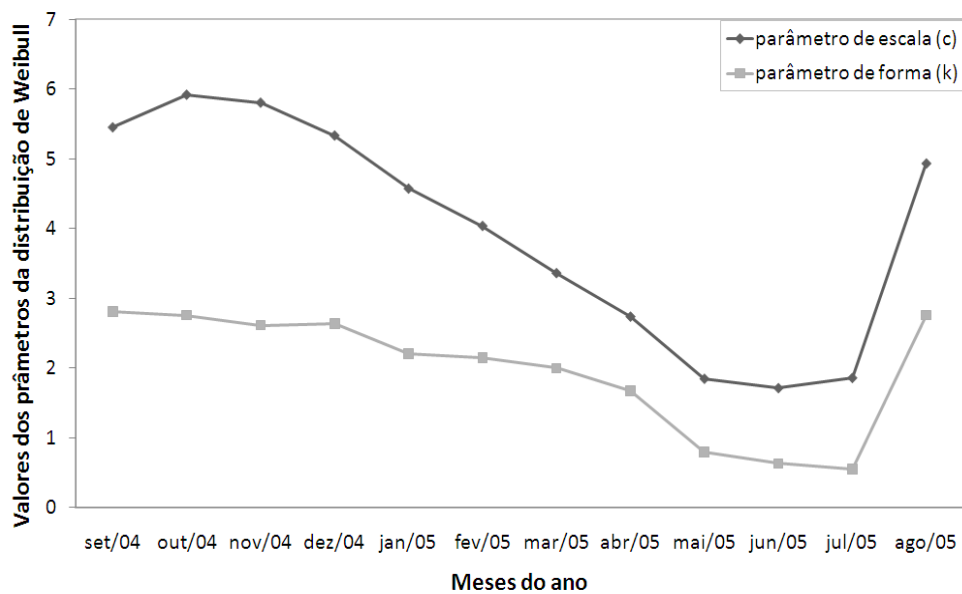


Figura 13 - Gráfico da variação do parâmetro de escala e forma para a distribuição de Weibull para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Barroquinha.

Nas Figuras 14 (a) e (b) apresentam-se as variações dos parâmetros da distribuição Log-Normal. Em geral, os resultados mostram uma diminuição dos valores mensais de  $E(X)$  nos meses correspondentes a estação chuvosa, entre fevereiro e abril, com

exceção para o mês de maio, e um aumento dos valores para os meses da estação seca, o que está concordante com o perfil de velocidade média do vento observado na região.

Em relação aos valores da variância  $V(X)$ , observa-se na Figura 14 (b), que se tem alta variabilidade dos valores de velocidade do vento entre os meses de março e agosto de 2005, sendo que para o mês de maio de 2005 tem-se um aumento significativo do valor de  $V(X)$ , que está associado a uma alta variabilidade dos dados observados de velocidade do vento na região (valor retirado para possibilitar a visualização do gráfico).

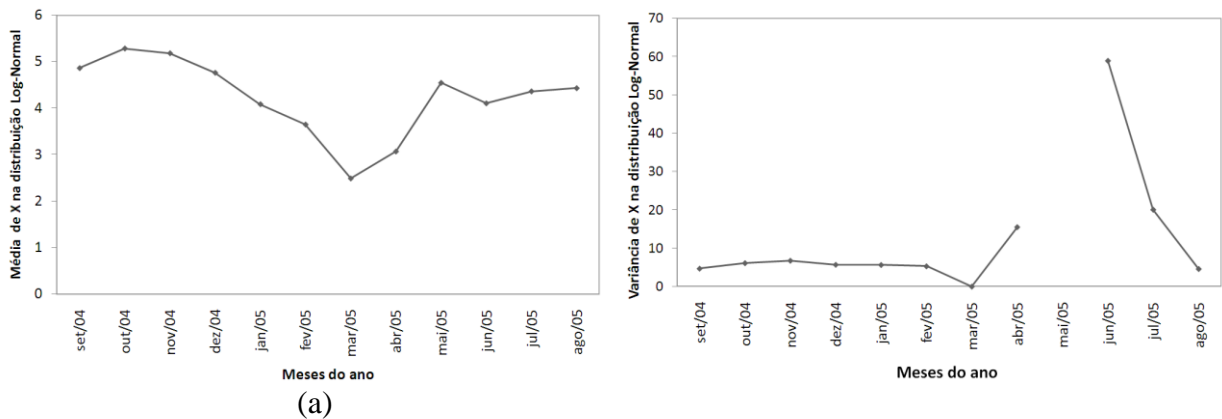


Figura 14 – Valores mensais dos parâmetros (a) Média  $E(X)$  e (b) variância  $V(X)$ , da distribuição Log-Normal obtidos com os dados de velocidade do vento observados na PCD de Barroquinha.

Assim, analisando-se os resultados encontrados para os parâmetros das distribuições estatísticas de Weibull e Log-Normal, e concordando com o visto na literatura citada, pode-se assumir que a distribuição de Weibull apresenta o melhor ajuste de curva aos dados de velocidade do vento observados nessa região, mostrado na Figura 15.

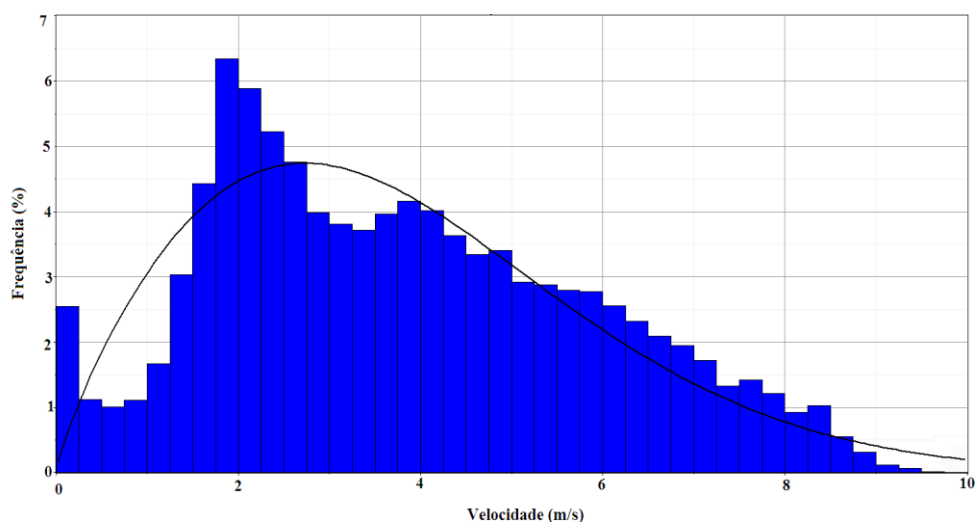


Figura 15 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Barroquinha.

A Figura 16 mostra a distribuição dos valores de densidade de potência eólica, obtidos através da distribuição estatística de Weibull e pelo método Máximo Teórico. Ressalta-se que o pico de variância dos valores de velocidade do vento observado em Barroquinha inviabilizou o uso da distribuição Log-Normal para a tarefa de obtenção da densidade de potência eólica da região.

Os resultados mostram que, com a distribuição de Weibull, encontram-se uma faixa de valores de densidade de potência eólica que vai de  $19,5 \text{ W/m}^2$  em abril de 2005 e  $124,8 \text{ W/m}^2$  em outubro de 2004.

Na Figura 17, tem se um diagrama de dispersão dos valores de densidade de potência eólicos calculados através da distribuição de Weibull comparados com os valores calculados pelo método do Máximo Teórico. Observa-se alto valor do coeficiente de correlação estatística (0,99), o que segundo Devore (2006), representa forte correlação entre as séries de valores obtidas por esses dois métodos, apesar dos valores obtidos com a distribuição de Weibull terem superestimado os valores obtidos com método Máximo Teórico.

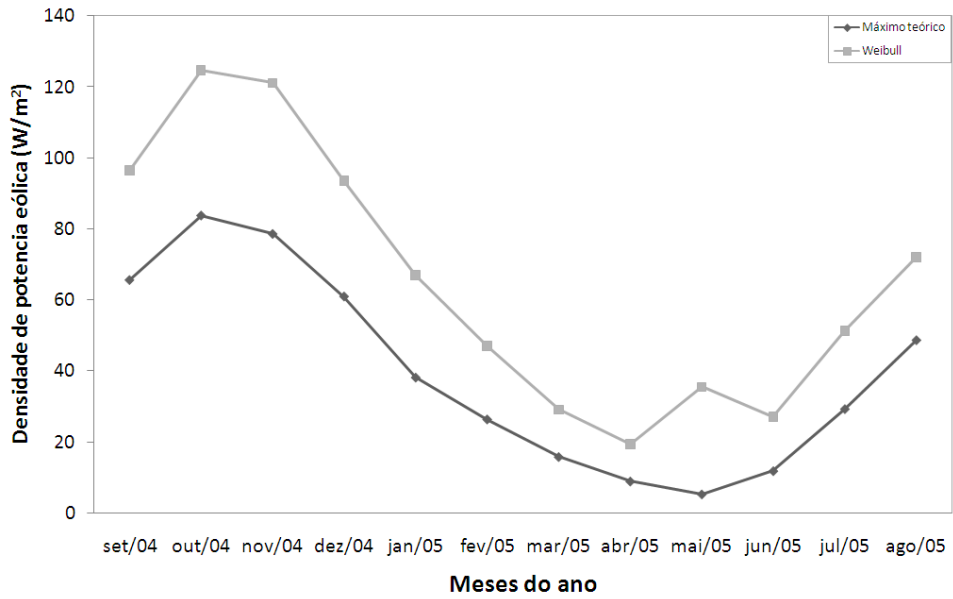


Figura 16 – Densidade de potência eólica obtida através da distribuição de Weibull e pelo método Máximo Teórico, para os dados de vento da PCD de Barroquinha.

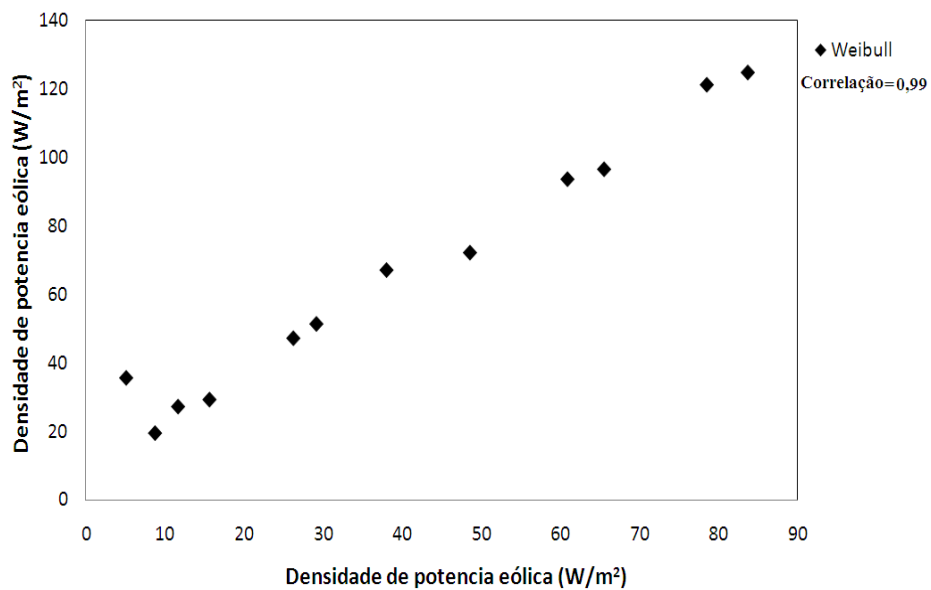


Figura 17 – Diagrama de dispersão da densidade de potência calculada pela distribuição de Weibull comparada com a densidade de potência calculada pelo Máximo Teórico.

### 4.3 Análise para os dados de vento observados na PCD do município de Aquiraz (litoral leste do Ceará)

A Figura 18 mostra o perfil mensal da velocidade média do vento ao longo dos meses dos anos de 2004 e de 2005, obtidos com as observações da PCD de Aquiraz, litoral leste do Ceará.

Encontram que os meses de março a junho ocorrem os menores valores médios de velocidade do vento na região, e os maiores ocorrem entre os meses de junho a fevereiro, e que a média anual da velocidade do vento na região é de aproximadamente 3,2 m/s.

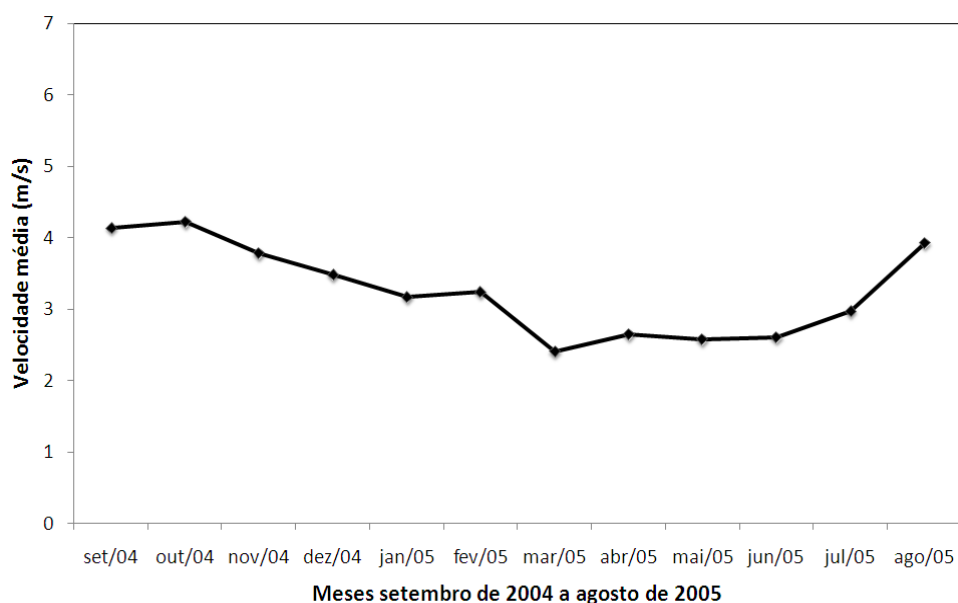


Figura 18 – Gráfico da velocidade média do vento, á 10 metros da superfície, em Aquiraz, no período de setembro de 2004 a agosto de 2005.

Em relação à direção predominante do vento na região, mostrada no gráfico polar da Figura 19, observa-se que, ao longo do ano o vento apresenta uma grande variação de ocorrência de eventos, em todas as direções da rosa dos ventos. Fato que, segundo Batista (2008) pode comprometer o aproveitamento do potencial eólico deste vento na região.

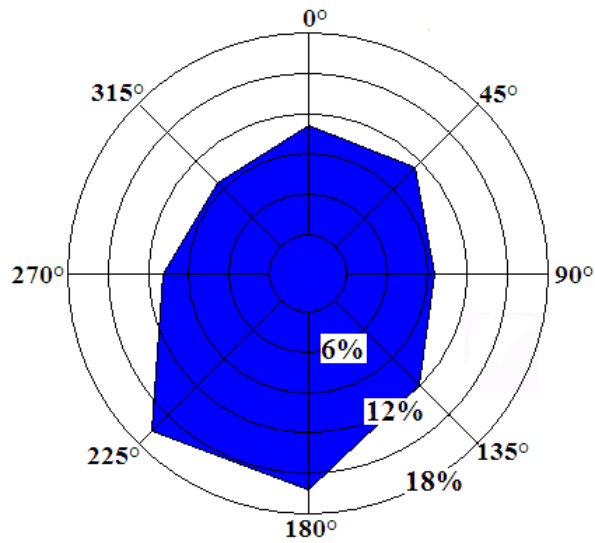


Figura 19 – Mapa da distribuição de frequência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, na região de Aquiraz, obtido com o uso do software gráfico Windographer®.

A Figura 20 mostra a variação mensal dos valores dos parâmetros de forma e de escala da distribuição de Weibull, obtidos para a PCD de Aquiraz. Em geral, os resultados encontrados mostram maiores valores para os meses de agosto a janeiro, e menores valores entre fevereiro e abril, de acordo com o perfil de velocidade do vento mostrado anteriormente.

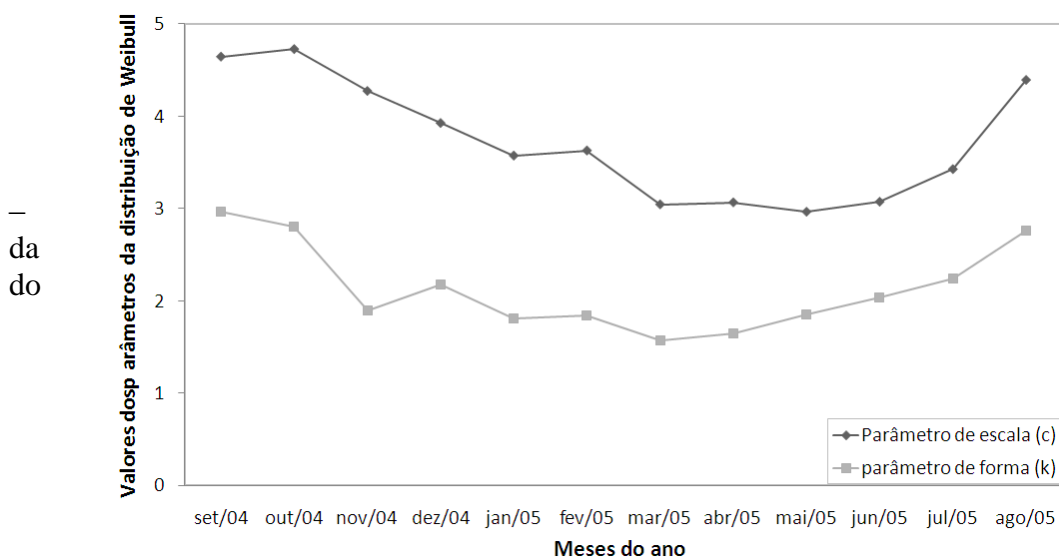


Figura 20  
Gráfico  
variação

parâmetro de escala e de forma para a distribuição de Weibull, obtidos para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Aquiraz.

Em relação à variação dos parâmetros da distribuição Log-Normal, que são mostrados na Figura 21 (a) e (b), abaixo. Menciona-se que, os valores mensais de  $E(X)$ , Figura 21 (a), são maiores durante os meses denominados secos, com diminuição relativa entre os meses da estação chuvosa.

Já os valores da variância  $V(X)$ , mostrados na Figura 21 (b), apresentam alta variabilidade, com valor máximo no mês de novembro de 200, comportamento semelhante à análise realizada para a cidade de Barroquinha, litoral oeste do Ceará. Dessa forma, como na situação anterior, assume-se que a distribuição de Weibull apresenta melhor ajuste de curva aos dados de velocidade do vento observados nessa região, mostrado na Figura 22.

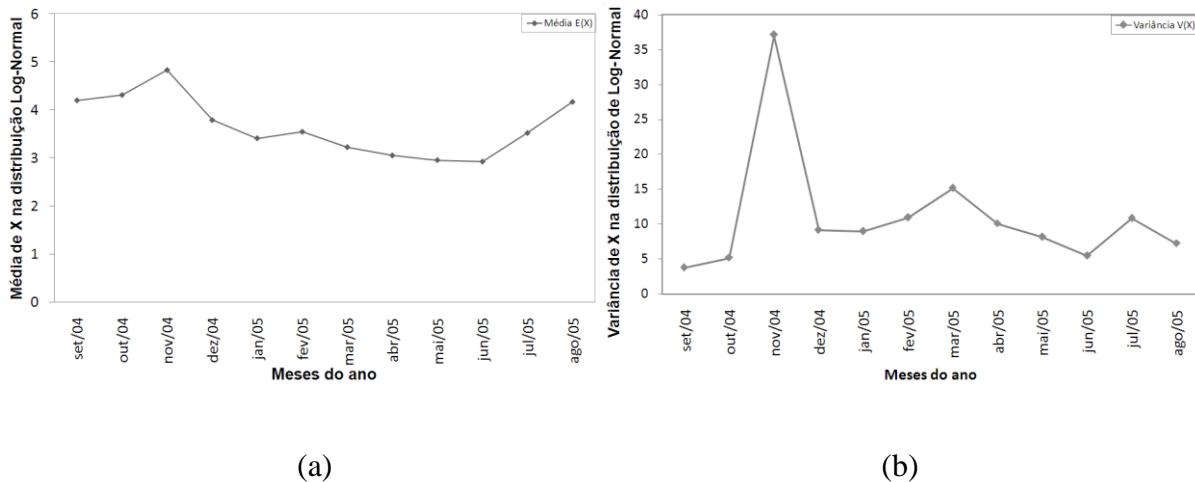


Figura 21 – Média  $E(X)$  e variância  $V(X)$  de  $X$  na distribuição Log-Normal para os dados de velocidade do vento observados na PCD de Aquiraz.

Na Figura 23 têm-se gráfico mostrando os valores de densidade de potência eólica obtida através das distribuições estatísticas de Weibull e do método Máximo Teórico. Observa-se que, qualitativamente, as curvas são concordantes, apesar dos valores obtidos com a distribuição estatística terem superestimados os valores pelo método teórico. Em adição, menciona-se que pelo fato dos valores de velocidade do vento, observados na região, apresentar alta variabilidade, também, inviabiliza o uso da distribuição Log-Normal na tarefa de obtenção da densidade de potência eólica dessa região.



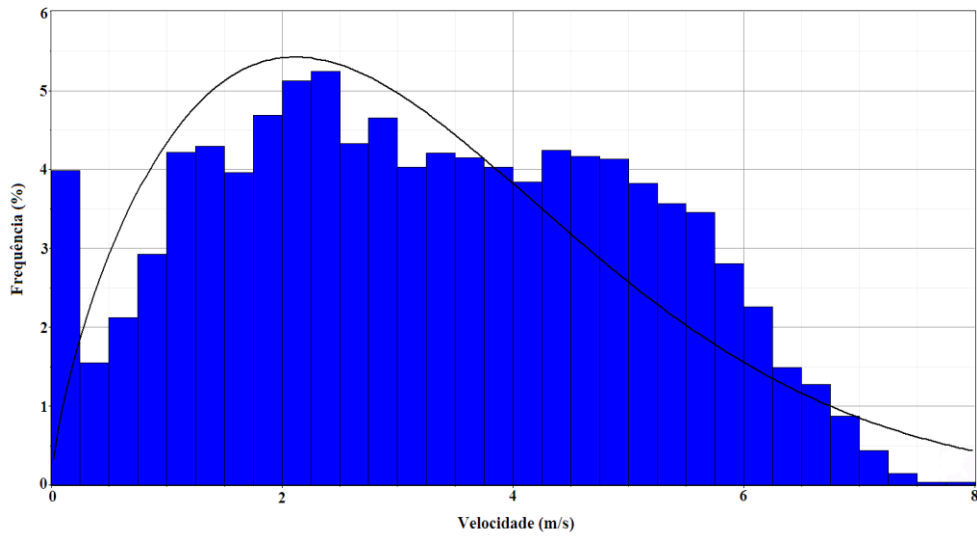


Figura 22 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Aquiraz.

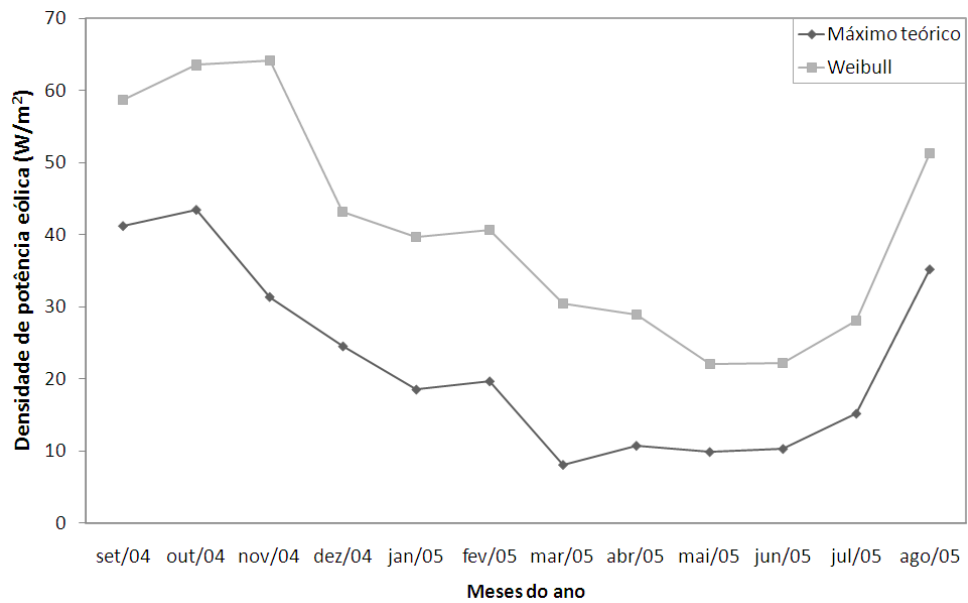


Figura 23 – Densidade de potência eólica obtida através da distribuição de Weibull e do método Máximo Teórico, para os dados de vento da PCD do município de Aquiraz.

Um diagrama de dispersão dos valores de densidade de potência eólica obtidos pela distribuição de Weibull e pelo método de Máximo Teórico é apresentado na Figura 24. Observa-se que o coeficiente de correlação estatística entre as duas séries de valores é de 0,93 que representa forte correlação estatística entre elas (Devore, 2006).

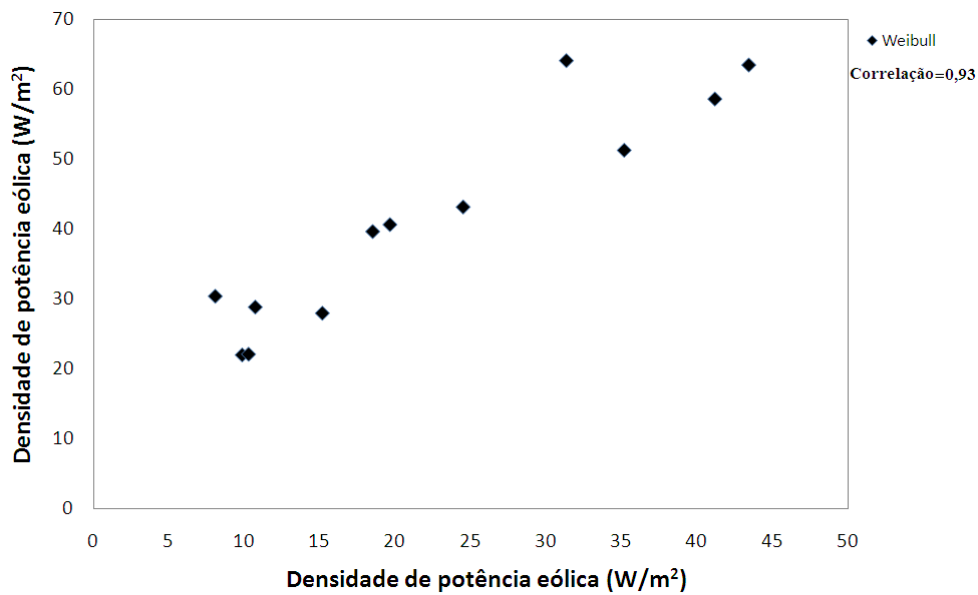


Figura 24 – Diagramas de dispersão dos valores de densidade de potência obtidos através da distribuição de Weibull e pelo método Máximo Teórico, para os dados da PCD de Aquiraz, litoral leste do Ceará.

#### 4.4 Análise para os dados de vento observados na PCD do município de Icapuí (litoral leste do Ceará)

Os valores médios mensais da velocidade do vento, ao longo dos meses de 2004 e 2005, obtidos na PCD da cidade de Icapuí, litoral leste do Estado do Ceará, são mostrados na Figura 25.

Encontra-se velocidade média anual do vento de aproximadamente 5,3 m/s, com menores valores médios entre os meses de fevereiro a junho, período em que se tem a estação chuvosa da região, e aumento relativo da velocidade média mensal do vento entre os meses de junho e fevereiro, meses correspondentes a estação seca da região. Assim, menciona-se mais uma vez a concordância desse regime de vento com a hipótese da complementaridade, citada na secção de revisão bibliográfica.

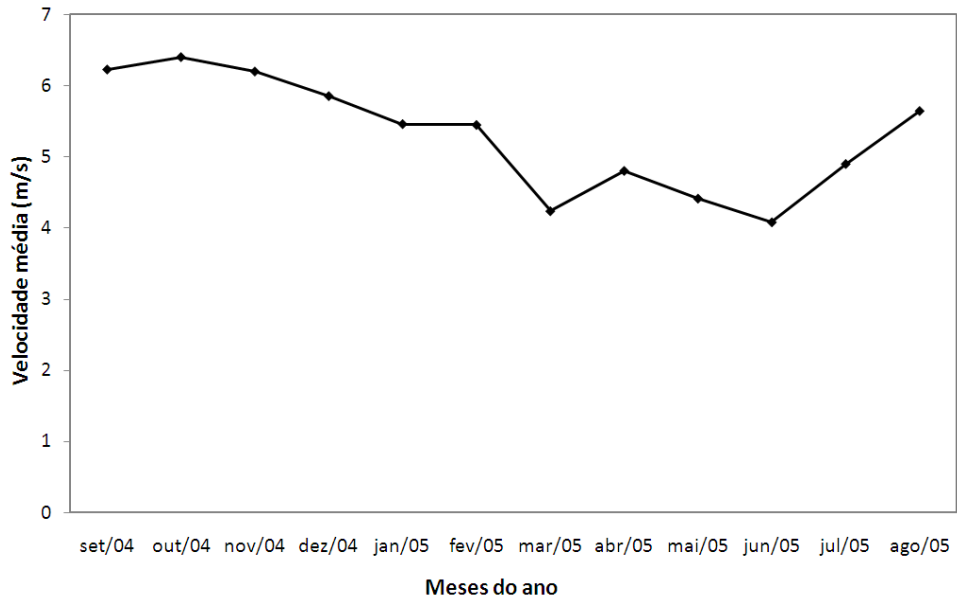


Figura 25 – Gráfico da velocidade média do vento, á 10 metros da superfície, em Icapuí, no período de setembro de 2004 à agosto de 2005.

A distribuição de freqüência da direção predominante do vento para a PCD de Icapuí é mostrada no gráfico polar da Figura 26. Observa-se que a direção do vento na região apresenta uma variação entre as direções leste e sudeste, apresentando predominância de sudeste ao longo do ano. Segundo Batista (2008) este fato é um indicativo de que essa região é um potencial sítio de geração de energia eólica.

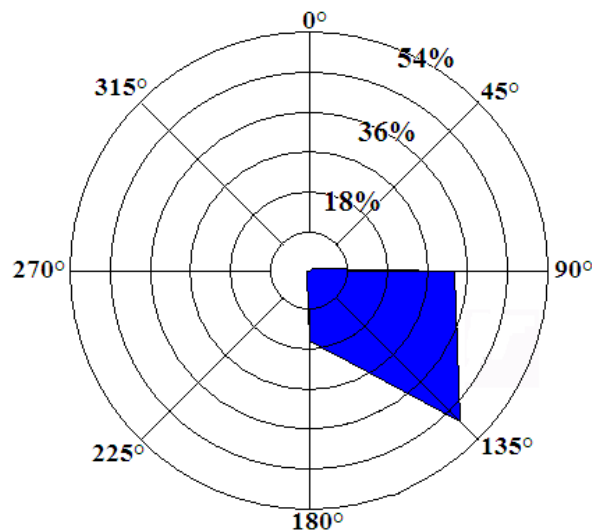


Figura 26 – Mapa da distribuição de freqüência de ocorrência da direção dos ventos, a 10 metros de altura da superfície, na região de Icapuí obtido com o uso do software gráfico Windographer®.

A variação mensal dos valores dos parâmetros da distribuição de Weibull é apresentada na Figura 27. Pode-se observar que os maiores valores desses parâmetros ocorrem nos meses considerados secos, entre julho e fevereiro, e os menores nos meses da estação chuvosa, entre fevereiro e junho, corroborando com o perfil mensal de velocidade média do vento observado na região.

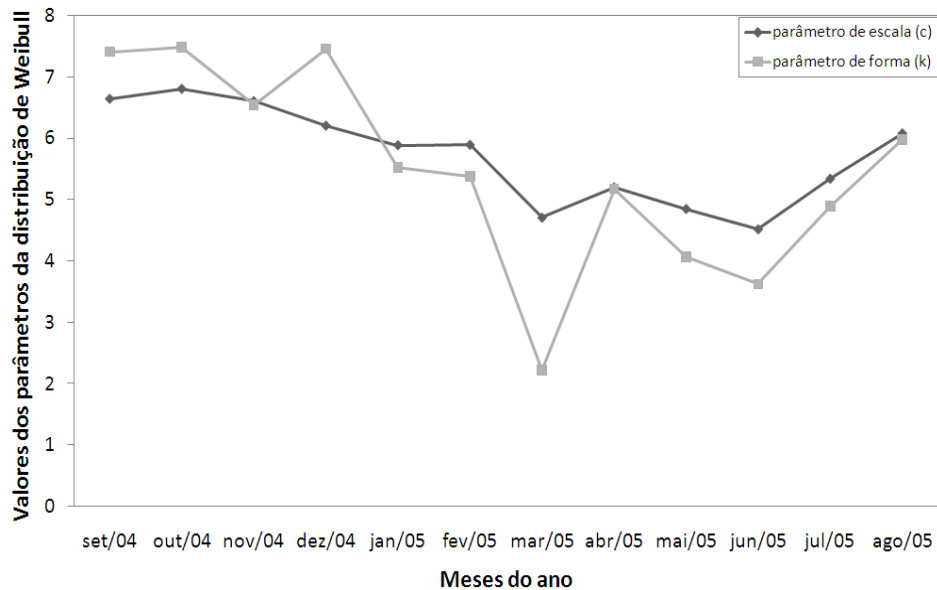


Figura 27 – Gráfico da variação do parâmetro de escala e forma para a distribuição de Weibull para os dados de velocidade do vento observado na PCD de Icapuí.

A Figura 28 mostra a variação dos valores dos parâmetros da distribuição estatística Log-Normal. Os resultados mostram uma diminuição dos valores mensais da média  $E(X)$  nos meses correspondentes a estação chuvosa e um aumento relativo dos valores no restante da série de dados.

O parâmetro variância  $V(X)$ , em que sua variação é mostrada na Figura 28, apresenta um máximo de valor que ocorre no mês de março de 2005. Desta forma, menciona-se que, como nos outros potenciais sítios analisados anteriormente, a distribuição de Weibull melhor se ajusta aos dados de velocidade do vento observados nessa região, como mostra na Figura 29.

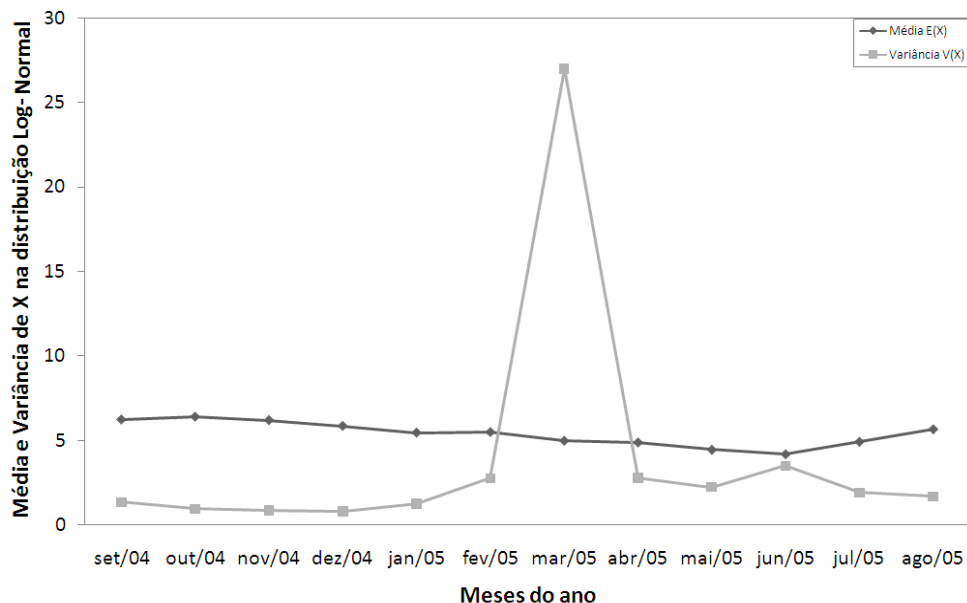


Figura 28 – Variação dos parâmetros, Média  $E(X)$  e variância  $V(X)$ , da distribuição Log-Normal para os dados de velocidade do vento observados na PCD de Icapuí.

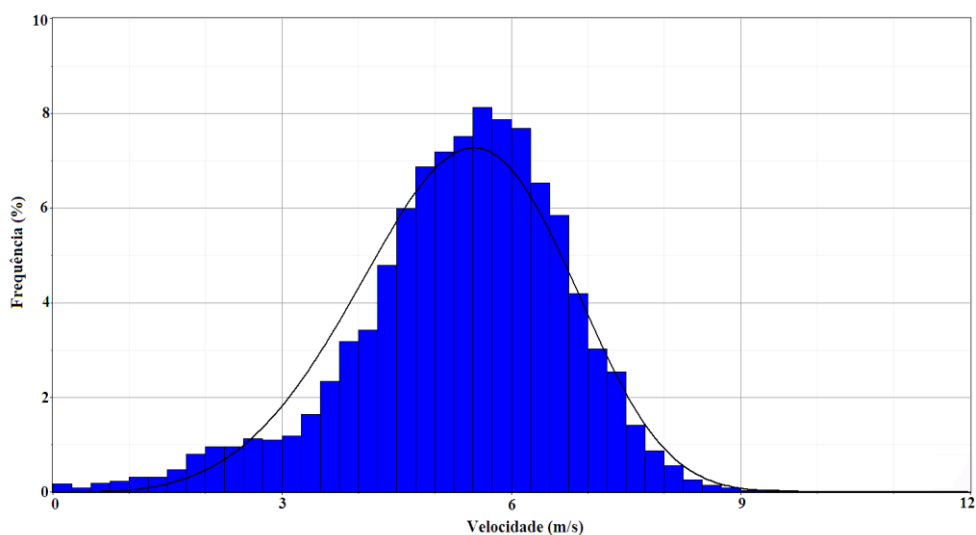


Figura 29 – Ajuste da curva da distribuição de Weibull aos dados de ventos observados na PCD de Icapuí.

A Figura 30 mostra a distribuição dos valores de densidade de potência eólica, obtidos através da distribuição estatística de Weibull e comparados com os obtidos pelo método Máximo Teórico. Os resultados mostram que, com a distribuição de Weibull, se obtém valores que vão de  $50,26 \text{ W/m}^2$  em junho de 2005 a  $162,28 \text{ W/m}^2$  em outubro de 2004. Cita-se que, apesar dos valores superestimarem os valores obtidos pelo método teórico, qualitativamente, as curvas se mostram concordantes.

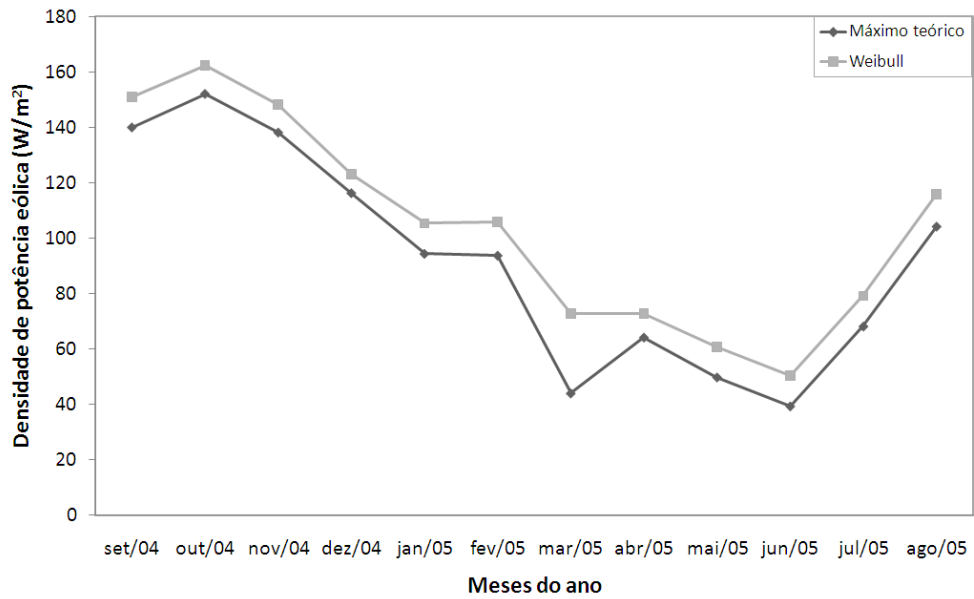


Figura 30 - Densidade de potência eólica obtida através da distribuição de Weibull e do método Máximo teórico, para os dados de velocidade do vento obtidos na PCD do município de Icapuí.

Na Figura 31 apresenta-se um diagrama de dispersão dos valores de densidade de potencia eólica obtidos pelas distribuições estatísticas de Weibull e Log-Normal comparados com os valores obtidos pelo método de Máximo Teórico.

Os resultados obtidos mostram alto coeficiente de correlação (0,99) entre as séries de valores obtidos pela distribuição de Weibull e pelo método de Máximo Teórico, o que representa forte correlação entre essas duas séries. Já para a série de valores obtidos pela distribuição Log-Normal e pelo método de Máximo Teórico tem-se uma baixa correlação, como valor de coeficiente de correlação estatística de 0,20.

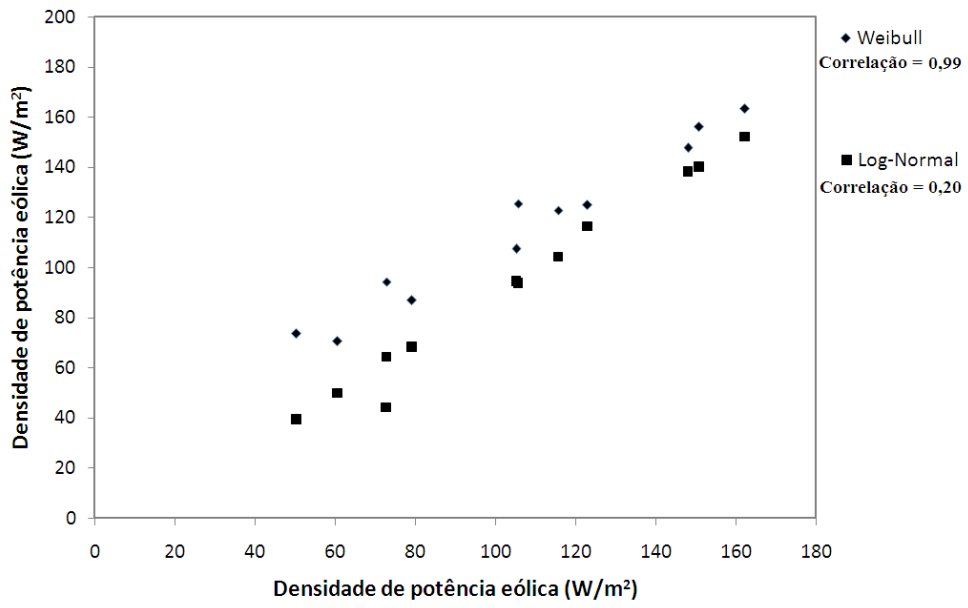


Figura 31 – Diagrama de dispersão dos valores da densidade de potência eólica calculados pelas distribuições de Weibull e Log-Normal comparados com os valores da densidade de potência eólica calculados pelo método Máximo Teórico.

## 5. CONCLUSÕES

Nesse estudo, teve-se como objetivo investigar a aplicação das distribuições de Weibull e Log-Normal, para obtenção de um ajuste de curva, bem como para a determinação dos valores da densidade de potencia eólica, relacionados aos dados de velocidade dos ventos observados nas regiões de Acaraú e Barroquinha, região litoral oeste, e de Aquiraz e Icapuí, região litoral leste do Estado do Ceará.

Com as análises dos perfis mensais de velocidade média do vento para os municípios das regiões do litoral leste e oeste do Estado, conclui-se que, em geral, se tem maiores valores de velocidade média mensal do vento nos meses correspondentes a estação seca e menores valores nos meses que fazem parte da estação chuvosa da região, o que corrobora com a hipótese de complementaridade ao regime hídrico, encontrada na literatura.

Em relação à direção predominante do vento nessas regiões, encontram-se que na região litoral oeste se tem ventos predominantes de leste, com variações de direção entre leste e sudeste em Acaraú, e de nordeste a sudeste em Barroquinha. Para a região litoral leste, encontra-se que, em Icapuí a direção predominante do vento é de sudeste, com alguns eventos de leste ao longo do ano, e para a região de Aquiraz, tem-se alta variabilidade da direção dos ventos observados.

Para os dados de vento observados obtidos na PCD de Acaraú, encontra-se que a distribuição de Weibull foi a que melhor proporcionou um ajuste de curva aos dados de velocidade do vento observados. No entanto, as duas distribuições testadas podem ser usadas como ferramenta metodológica para o cálculo dos valores da densidade de potência eólica da região, já que apresentam forte correlação estatística entre as series de valores obtidas com os valores obtidos pelo método Máximo Teórico.

Em Barroquinha tem-se uma alta variabilidade dos dados de velocidade do vento no período que vai de março a agosto de 2005, o que inviabilizou o uso da distribuição Log-Normal para obtenção dos dados de densidade de potência eólica na região. Porém, quando se calcularam os valores da densidade de potência eólica usando-se a distribuição de Weibull obtendo-se uma forte correlação  $r = 0,99$  com a série de valores obtidos pelo método Máximo Teórico.



Para as regiões pertencentes ao litoral leste do Estado (Aquiraz e Icapuí), encontram-se, também, o melhor ajuste de curva aos dados de velocidade do vento observados com a distribuição de Weibull. Assim, tem-se forte correlação estatística entre as séries de valores de densidade de potência eólica obtidos com o uso dos parâmetros dessa distribuição, quando comparados com as séries obtidas pelo método Máximo Teórico para essas regiões.

Em resumo, menciona-se que, concordando com o proposto nos estudos apresentados na revisão bibliográfica, a estimativa do potencial eólico de uma região deve ser resultado de um processo investigativo, que implica na obtenção de um melhor ajuste de curva dos dados de velocidade do vento observado na região, após testes com diferentes distribuições de probabilidade, para que, em sequência, se possam obter estimativas da densidade de potência eólica que caracterize essa região como possível sítio de geração de energia eólica.

## 6. Referência Bibliográficas

DUTRA, R. M., Viabilidade Técnico-Ecônômica da Energia Eólica face ao novo marco Regulatório do Setor Elétrico Brasileiro – UFRJ/COPPE, 2001 Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético).

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

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

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.

LIMA, Francisco José Lopes de ; SILVA, E. M. ; VIEIRA, Cícero Fernandes Almeida . Avaliação da Aplicação das Distribuições de Probabilidade de Weibull, de Rayleigh e Log-Normal para Obtenção da Densidade de Potência Eólica na Região Jaguaruana/CE: Estudo de Casos para os Anos de 2004 e 2005.. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo. CDROM - XV CBMET, 2008.

MACÊDO, Ana Paula Barbosa Ávila ; MALAGUTTI, Marta ; SOUSA, Inajá Francisco de . Avaliação do Potencial Eólico de Boquim-Se. In: IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1996, Campos do Jordão. IX Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1996. v. 1. p. 224-227.

MOURA, A. P., et al. Use of the Weibull and Rayleigh Distributions as Tools for Forecast of the Power, Generated Energy and Losses in a Distribution System: a Case Study. **VI Induscon – Conferência de Aplicações Industriais**. Joinvile, SC, 2004.

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. . O modelo de Weibull para distribuição da velocidade do vento no Estado do Rio de Janeiro.. In: do VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1990, Salvador-BA. Anais do VI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1990. v. II. p. 593-597.

VIEIRA, A. R. R., MARQUES JUNIOR, S., SILVA, L. Z. Proposição da estimativa do potencial eólico de uma região. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10. 1998, Brasília, DF. **Anais...**, Brasília: SBMET, 1998.