

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HELLY FALCÃO MAIA NETO

**ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE SETE MÉTODOS NUMÉRICOS
PARA DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE WEIBULL
UTILIZANDO DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO E DE POTÊNCIA EÓLICA**

FORTALEZA

2012

HEL Y FALCÃO MAIA NETO

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE SETE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE WEIBULL UTILIZANDO
DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO E DE POTÊNCIA EÓLICA.

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Prof.^a Dra. Carla Freitas de
Andrade – UFC.

Co-Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre
Costa Rocha – UFC.

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- M184a Maia Neto, Hely Falcão.
 Análise comparativa da eficiência de sete métodos numéricos para determinação dos parâmetros da curva de weibull utilizando dados de velocidade do vento e de potência eólica / Hely Falcão Maia Neto – 2012.
 84 f. : il., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2012.
 Área de Concentração: Energias Renováveis.
 Orientação: Profa. Dra. Carla Freitas de Andrade.
 Coorientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.
1. Distribuição de weibull. 2. Potencial eólico. 3. Métodos numéricos. 4. Análise comparativa. I.
Título.

HELLY FALCÃO MAIA NETO

ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DE SETE MÉTODOS NUMÉRICOS PARA
DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CURVA DE WEIBULL UTILIZANDO
DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO E DE POTÊNCIA EÓLICA.

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica. Área de
Concentração: Energias Renováveis.

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dra. Carla Freitas de Andrade (Orientadora)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Co-Orientador)

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Carneiro de Andrade

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho aos meus pais, José Tanilson Sá e Silene Falcão Sá, pelo apoio, confiança e incentivos fornecidos no decorrer da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter propiciado saúde, empenho, discernimento, equilíbrio e motivação a minha pessoa durante a elaboração desta Dissertação.

Ao corpo Docente da Universidade Federal do Ceará por permitir o meu desenvolvimento pessoal, profissional e intelectual no decorrer dos Cursos de Graduação em Engenharia Mecânica e Mestrado em Engenharia Mecânica.

A Prof.^a Dra. Carla Freitas de Andrade pela excelente orientação fornecida durante todas as fases de elaboração do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha por contribuir com sua experiência e conhecimento na estruturação desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. José Carneiro de Andrade que cooperou com suas preciosas observações e por valorizar e incentivar a realização de estudos sobre Energia Eólica.

A minha esposa Gislene Falcão e a meu filho Lucas Falcão por serem a fonte energética que impulsiona a minha vida.

Aos colegas do Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica pela amizade, companheirismo e oportunidade de realizar trabalhos em equipe, unindo forças e conhecimentos na execução das tarefas demandadas ao longo desta jornada.

“Estima a sabedoria e ela te exaltará; se a abraçares,
ela te honrará; dará a tua cabeça um diadema de
graça e uma coroa de glória te entregará”.

(Provérbios 4:8)

RESUMO

Para determinar o potencial eólico de uma região é de fundamental importância que seja realizado um estudo sobre as características intrínsecas do vento do local. Este trabalho aborda alguns métodos numéricos a serem empregados no cálculo dos parâmetros da distribuição de Weibull que auxilia no estudo da velocidade do vento, para que haja uma correta definição das condições naturais existentes. O prévio conhecimento destas informações coopera no processo de tomada de decisão sobre a viabilidade técnica na instalação de novos parques eólicos industriais. É realizada uma análise estatística entre sete sistemas matemáticos conhecidos da literatura para estimar os parâmetros (k) de forma e (c) de escala da curva de distribuição de frequências de Weibull. São utilizados dados de velocidade do vento e de potência eólica de duas cidades litorâneas do Estado do Ceará pertencentes à região Nordeste do Brasil, Icapuí e Camocim. Os métodos apurados no desenvolvimento desta pesquisa são: Método Gráfico, Método da Máxima Verossimilhança, Método da Máxima Verossimilhança Modificado, Método Empírico, Método do Momento, Método da Energia Padrão e Método da Energia Equivalente. A realização da análise comparativa de eficiência e exatidão entre estes, compreende a aplicação dos seguintes testes estatísticos: Análise de Variância (R^2), Raiz Quadrada dos Erros Quadráticos Médios ($RMSE$) e Teste do Qui-quadrado (X^2).

Palavras-Chave: Distribuição de Weibull. Potencial eólico. Métodos numéricos. Análise comparativa. Eficiência.

ABSTRACT

To determine the wind potential of a region is of paramount importance that a study be conducted on the intrinsic characteristics of the wind site. This paper address some numerical methods to be used in calculating the parameters of the Weibull distribution the aids in the study of wind speed, so there is a correct definition of natural conditions existing. The previous knowledge of this information assist in the decision-making process on the technical feasibility of installing industrial wind farms. It perform a statistical analysis of seven mathematical systems known in the literature for estimating the parameters (k) form and (c) scale of the frequency distribution curve of Weibull. Data are used for wind speed and wind power from two coastal cities of Ceará State belonging to Northeast Brazil, Icapuí and Camocim. The methods to be employed in the development of this research are: Graphical Method, Maximum Likelihood Method, Maximum Likelihood Modified Method, Empirical Method, Moment Method, Energy Pattern Factor Method and the Equivalent Energy Method. The realization of the comparative analysis of efficiency and accuracy among these include the application of the following statistical tests: ANOVA (R^2), Square Root of Average Quadratic Errors ($RMSE$) and Chi-square (X^2).

Keywords: Weibull distribution. Wind potential. Numerical methods. Comparative analysis. Efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte – Brasil..... | 18 |
| Figura 2 - Distribuição média da velocidade dos ventos no Ceará..... | 19 |
| Figura 3 - Evolução da taxa de crescimento da geração de energia eólica no Ceará..... | 20 |
| Figura 4 - Usina eólica de Formosa localizada em Camocim-Ce..... | 21 |
| Figura 5 - Mapa geográfico do Estado do Ceará..... | 24 |
| Figura 6 - Distribuição de Weibull para diferentes valores de k | 30 |
| Figura 7 - Método gráfico Icapuí – Novembro 2010..... | 33 |
| Figura 8 - Distribuição dos ventos em Camocim - Abril 2005..... | 40 |
| Figura 9 - Modelo de anemômetro utilizado pela FUNCEME (2012)..... | 41 |
| Figura 10 - Distribuição de Weibull – Paracuru Agosto 2004..... | 44 |
| Figura 11 - Distribuição de Weibull – Icapuí Janeiro 2010..... | 47 |
| Figura 12 - Distribuição de Weibull – Icapuí Fevereiro 2010..... | 48 |
| Figura 13 - Distribuição de Weibull – Icapuí Março 2010..... | 49 |
| Figura 14 - Distribuição de Weibull – Icapuí Abril 2010..... | 50 |
| Figura 15 - Distribuição de Weibull – Icapuí Maio 2010..... | 51 |
| Figura 16 - Distribuição de Weibull – Icapuí Junho 2010..... | 52 |
| Figura 17 - Distribuição de Weibull – Icapuí Julho 2010..... | 53 |
| Figura 18 - Distribuição de Weibull – Icapuí Agosto 2010..... | 54 |
| Figura 19 - Distribuição de Weibull – Icapuí Setembro 2010..... | 55 |
| Figura 20 - Distribuição de Weibull – Icapuí Outubro 2010..... | 56 |
| Figura 21 - Distribuição de Weibull – Icapuí Novembro 2010..... | 57 |

| | |
|---|----|
| Figura 22 - Distribuição de Weibull – Icapuí Dezembro 2010..... | 58 |
| Figura 23 - Distribuição de Weibull – Camocim Janeiro 2005..... | 59 |
| Figura 24 - Distribuição de Weibull – Camocim Fevereiro 2005..... | 60 |
| Figura 25 - Distribuição de Weibull – Camocim Março 2005..... | 61 |
| Figura 26 - Distribuição de Weibull – Camocim Abril 2005..... | 62 |
| Figura 27 - Distribuição de Weibull – Camocim Maio 2005..... | 63 |
| Figura 28 - Distribuição de Weibull – Camocim Junho 2005..... | 64 |
| Figura 29 - Distribuição de Weibull – Camocim Julho 2005..... | 65 |
| Figura 30 - Distribuição de Weibull – Camocim Agosto 2005..... | 66 |
| Figura 31 - Distribuição de Weibull – Camocim Setembro 2005..... | 67 |
| Figura 32 - Distribuição de Weibull – Camocim Outubro 2005..... | 68 |
| Figura 33 - Distribuição de Weibull – Camocim Novembro 2005..... | 69 |
| Figura 34 - Distribuição de Weibull – Camocim Dezembro 2005..... | 70 |
| Figura 35 - Distribuição de Weibull – Icapuí 2010..... | 71 |
| Figura 36 - Distribuição de Weibull – Camocim 2005..... | 74 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Evolução da geração de energia eólica no Brasil (2002 a 2011)..... | 19 |
| Tabela 2 - Fluxo do consumo de eletricidade no Ceará (1993 a 2007)..... | 23 |
| Tabela 3 - Análise Estatística – Paracuru Agosto 2004..... | 43 |
| Tabela 4 - Análise Estatística – Icapuí Janeiro 2010..... | 47 |
| Tabela 5 - Análise Estatística – Icapuí Fevereiro 2010..... | 48 |
| Tabela 6 - Análise Estatística – Icapuí Março 2010..... | 49 |
| Tabela 7 - Análise Estatística – Icapuí Abril 2010..... | 50 |
| Tabela 8 - Análise Estatística – Icapuí Maio 2010..... | 51 |
| Tabela 9 - Análise Estatística – Icapuí Junho 2010..... | 52 |
| Tabela 10 - Análise Estatística – Icapuí Julho 2010..... | 53 |
| Tabela 11 - Análise Estatística – Icapuí Agosto 2010..... | 54 |
| Tabela 12 - Análise Estatística – Icapuí Setembro 2010..... | 55 |
| Tabela 13 - Análise Estatística – Icapuí Outubro 2010..... | 56 |
| Tabela 14 - Análise Estatística – Icapuí Novembro 2010..... | 57 |
| Tabela 15 - Análise Estatística – Icapuí Dezembro 2010..... | 58 |
| Tabela 16 - Análise Estatística – Camocim Janeiro 2005..... | 59 |
| Tabela 17 - Análise Estatística – Camocim Fevereiro 2005..... | 60 |
| Tabela 18 - Análise Estatística – Camocim Março 2005..... | 61 |
| Tabela 19 - Análise Estatística – Camocim Abril 2005..... | 62 |
| Tabela 20 - Análise Estatística – Camocim Maio 2005..... | 63 |
| Tabela 21 - Análise Estatística – Camocim Junho 2005..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Tabela 22 - Análise Estatística – Camocim Julho 2005..... | 65 |
| Tabela 23 - Análise Estatística – Camocim Agosto 2005..... | 66 |
| Tabela 24 - Análise Estatística – Camocim Setembro 2005..... | 67 |
| Tabela 25 - Análise Estatística – Camocim Outubro 2005..... | 68 |
| Tabela 26 - Análise Estatística – Camocim Novembro 2005..... | 69 |
| Tabela 27 - Análise Estatística – Camocim Dezembro 2005..... | 70 |
| Tabela 28 - Análise Estatística – Icapuí 2010..... | 72 |
| Tabela 29 - Análise Comparativa velocidade dos ventos – Icapuí 2005..... | 72 |
| Tabela 30 - Análise Comparativa potência eólica – Icapuí 2010..... | 73 |
| Tabela 31 - Análise Estatística – Camocim 2005..... | 74 |
| Tabela 32 - Análise Comparativa velocidade dos ventos – Camocim 2005..... | 75 |
| Tabela 33 - Análise Comparativa potência eólica – Camocim 2005..... | 75 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------------|--|
| $f(v)$ | Função densidade de probabilidades de Weibull. |
| $F(v)$ | Função cumulativa de distribuição de Weibull |
| k | Parâmetro de forma da distribuição de Weibull |
| c | Parâmetro de escala da distribuição de Weibull |
| v | Velocidade do vento |
| σ | Desvio Padrão |
| N | Número de observações |
| Γ | Função gamma |
| E_{pf} | Fator de Energia Padrão |
| v^3 | Cubo da velocidade do vento |
| $\sum \epsilon v_i$ | Soma dos erros de aproximação |
| v_i | Velocidade do vento no intervalo i |
| X^2 | Teste do Qui-quadrado |
| n | Número de intervalos |
| $RMSE$ | Raiz quadrada dos erros quadráticos médios |
| R^2 | Análise de variância |
| PE | Densidade de Potência Eólica |
| ρ | Densidade relativa do ar |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 1.1 | Estruturação dos Capítulos..... | 22 |
| 1.2 | Justificativa..... | 22 |
| 1.3 | Localização Geográfica..... | 24 |
| 2 | OBJETIVOS..... | 25 |
| 3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 26 |
| 4 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 29 |
| 4.1 | A Distribuição de Weibull..... | 29 |
| 4.2 | Métodos Numéricos para estimar os parâmetros k e c | 31 |
| 4.2.1 | <i>Método Empírico.....</i> | 31 |
| 4.2.2 | <i>Método da Energia Padrão.....</i> | 32 |
| 4.2.3 | <i>Método Gráfico.....</i> | 33 |
| 4.2.4 | <i>Método do Momento.....</i> | 34 |
| 4.2.5 | <i>Método da Máxima Verossimilhança.....</i> | 35 |
| 4.2.6 | <i>Método da Máxima Verossimilhança Modificado.....</i> | 36 |
| 4.2.7 | <i>Método da Energia Equivalente.....</i> | 37 |
| 4.3 | Análise Estatística dos resultados..... | 38 |
| 4.3.1 | <i>Teste do Qui-quadrado.....</i> | 38 |
| 4.3.2 | <i>Teste RMSE.....</i> | 39 |
| 4.3.3 | <i>Teste Análise de Variância.....</i> | 39 |
| 5 | METODOLOGIA..... | 40 |
| 5.1 | Aquisição dos dados anemométricos..... | 41 |
| 5.2 | Validação e condicionamento dos dados levantados..... | 42 |
| 5.3 | Cálculos dos parâmetros k e c | 43 |
| 5.4 | Análise Comparativa dos resultados..... | 44 |
| 6 | APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS..... | 46 |
| 6.1 | Curvas e Tabelas mensais – Icapuí 2010..... | 46 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 6.2 | Curvas e Tabelas mensais – Camocim 2005..... | 59 |
| 6.3 | Curvas e Tabelas anuais – Icapuí 2010 e Camocim 2005..... | 71 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 76 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 77 |
| | ANEXOS..... | 81 |

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um insumo essencial para o desenvolvimento econômico e industrial de uma região, sendo os combustíveis fósseis a principal fonte de geração. Todavia, estas fontes não renováveis apresentam alguns inconvenientes como: são dependentes da extração, exploração e refino do petróleo e sua queima produz a liberação de gás carbônico colaborando para a formação do efeito estufa e conseqüentemente o aquecimento global.

Algumas fontes renováveis estão sendo estudadas como alternativas na geração de energia elétrica, dentre estas despontam: eólica, solar e hidráulica. A energia eólica demonstra ser uma opção bastante atraente principalmente para locais que possuem uma boa constância e magnitude na velocidade dos ventos. A região litorânea do Estado do Ceará apresenta estas características e vêm se destacando no Brasil como o principal polo gerador e fornecedor deste importante e estratégico insumo para o país (ANEXO A).

Esta forma de energia já é utilizada há cerca de 3.000 anos. Na era moderna, no início do século XX, o homem utilizava a força dos ventos para bombear água e moer grãos. A utilização de energia eólica nos dias de hoje se dá quase de forma exclusiva para geração de energia elétrica.

Observam-se diversas vantagens ao utilizar o vento como matriz energética, podendo-se citar: fonte abundante, inesgotável e presente na natureza, não poluente, não produz lixo tóxico, radioativo ou liberação de gás carbônico, é uma fonte limpa e segura.

As viabilidades técnica e econômica para implantar parques eólicos industriais dependem fundamentalmente da sua matéria-prima principal: o vento. Por isso, é necessário realizar estudos sobre o seu desempenho, pois o mesmo influenciará nos cálculos da capacidade de geração e eficiência do processo. O conhecimento prévio do comportamento desta variável ao longo do ano ajudará no dimensionamento e escolha assertiva dos modelos de aerogeradores a serem instalados.

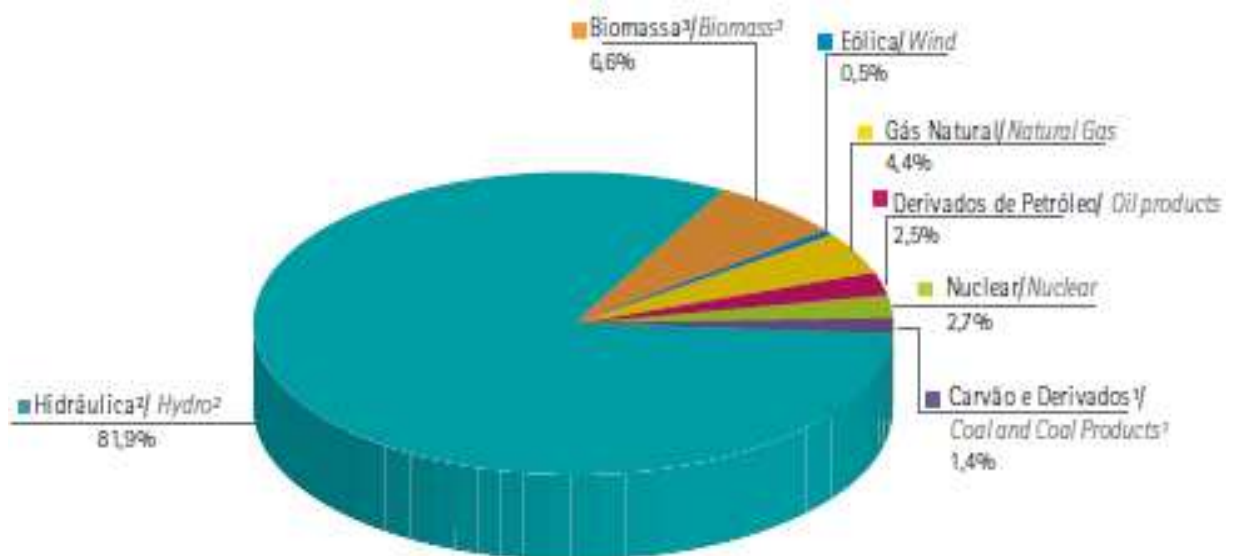
Ao comparar a variabilidade da velocidade dos ventos entre horários e estações climáticas similares de diferentes anos é desejável que os resultados sejam aproximados, pois assim haverá um maior aproveitamento energético. No entanto, trata-se de uma variável aleatória, modificando continuamente o seu valor no decorrer do dia. Necessita-se, portanto, coletar e organizar os seus registros em séries temporais de densidade de probabilidades para que uma análise estatística seja realizada.

O modelo de distribuição de frequências de Weibull tem sido uma ferramenta continuamente solicitada por pesquisadores em diversas regiões de diferentes países do mundo. É modelada por uma função matemática contínua, denominada função de densidade de probabilidades, muito usada em estudos de tempo de vida útil de equipamentos e estimativa de ocorrência de falhas.

Neste trabalho, são abordados sete métodos numéricos para estimar os parâmetros da curva de Weibull, utilizando os dados de velocidade do vento e de potência eólica coletados em torres anemométricas localizadas nas cidades litorâneas de Camocim e Icapuí. Em seguida, realiza-se uma análise comparativa dos resultados, considerando as seguintes relações: teste do Qui-quadrado (X^2), teste da raiz quadrada dos erros quadráticos médios ($RMSE$) e análise de variância (R^2). Estas relações foram escolhidas por demonstrarem ser suficientemente apropriadas na realização de estudos análogos.

Segundo dados do Ministério das Minas e Energia, através do Balanço Energético Nacional (BEN, 2012) a energia eólica representa 0,5% da geração total de energia elétrica nacional, sendo o restante proveniente de outras fontes energéticas, destacando-se a matriz hidráulica responsável por 81,9% deste total (FIGURA 1).

Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte – Brasil



Fonte: Ministério das Minas e Energia do Brasil (2012).

Os relatórios gerados pelo BEN (2012) apontam que a produção de eletricidade, a partir da fonte eólica, alcançou 2.705 (GWh) em 2011, representando um incremento de 24,3% em relação ao ano anterior quando alcançou a expressiva marca de 2.177 (GWh) (TABELA 1).

Tabela 1 – Evolução da geração de energia eólica no Brasil (2002 a 2011)

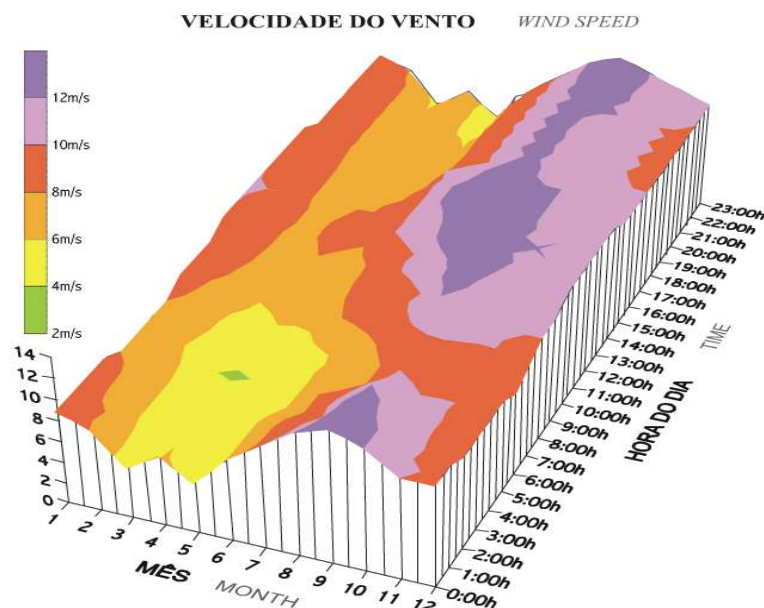
| FLUXO | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | GWh |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------------------------------|
| GERAÇÃO TOTAL ¹ | 56 | 63 | 74 | 74 | 342 | 668 | 1.183 | 1.238 | 2.177 | 2.705 | TOTAL GENERATION ¹ |
| CONSUMO TOTAL | 56 | 63 | 74 | 74 | 342 | 668 | 1.183 | 1.238 | 2.177 | 2.705 | TOTAL CONSUMPTION |

¹ Para estimar dados não informados, foi considerado o fator de capacidade médio do parque eólico nacional de 32,0% / ¹ In order to estimate the data not reported, it was considered 32.0% as the average capacity factor of the national windfarms.

Fonte: Ministério das Minas e Energia do Brasil (2012).

O Estado do Ceará está situado numa região com contínua circulação atmosférica subequatorial dos ventos alísios, intensificados pelas brisas marinhas ao longo de 640 km de seu perímetro litorâneo com o Oceano Atlântico. A intensidade de ventos local é mais elevada durante o dia. Este fato reflete a origem solar dos ventos pelo aquecimento desigual da superfície da Terra, conforme gráfico fornecido pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA-CE, 2008).

Figura 2 – Distribuição média da velocidade dos ventos no Ceará

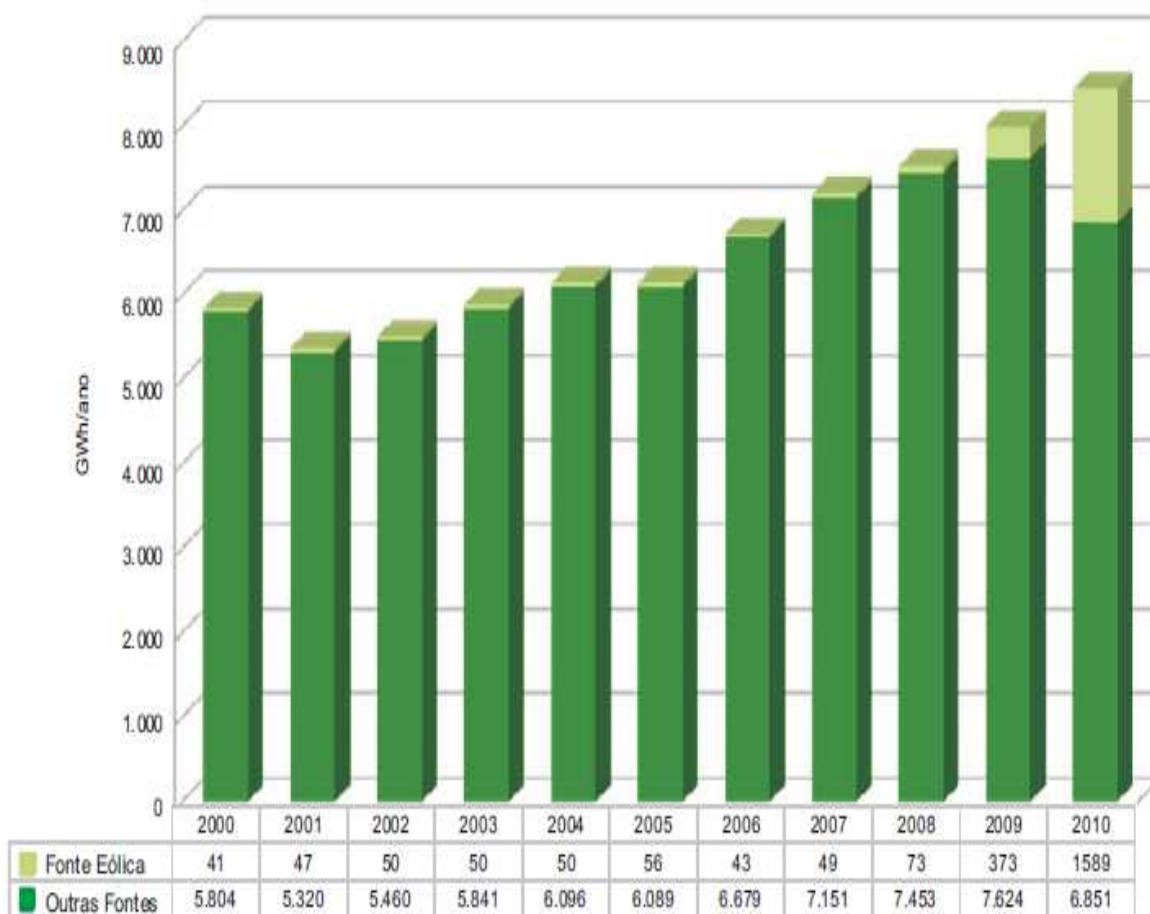


Fonte: Atlas do Potencial Eólico do Ceará – SEINFRA-CE (2008).

Com ventos praticamente constantes o ano todo e com o grande incentivo financeiro e apoio governamental disponibilizado atualmente, estas localidades destacam-se por serem oportunas na exploração e instalação de novas usinas eólicas, captando também cada vez mais investidores da iniciativa privada que estão apostando na utilização da energia eólica como matriz energética do futuro.

O Estado do Ceará pretende se consolidar no cenário nacional como importante centro provedor de energia eólica e vem apresentando uma evolução significativa em sua produção nos últimos anos (FIGURA 3).

Figura 3 – Evolução da taxa de crescimento da geração de energia eólica no Ceará



Fonte: Balanço Energético do Estado do Ceará (BEECE, 2008).

Para contribuir com a evolução deste cenário, é necessário pesquisar e selecionar localidades que possuam características naturais favoráveis aos estudos, com excelente qualidade dos ventos, tanto nos quesitos da constância quanto das velocidades médias obtidas.

As cidades escolhidas estão situadas perto de grandes centros consumidores e são substancialmente atrativas do ponto de vista técnico, econômico e de logística relacionados à interligação com a rede de distribuição elétrica da concessionária local.

Alguns empreendimentos já se encontram em plena operação, como a usina eólica de Formosa, localizada na cidade de Camocim, que possui 50 aerogeradores de 2,1 (MWh) de potência totalizando 105 (MWh), integrante do Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Eólica (PROINFRA) do Governo Federal (FIGURA 4).

Figura 4 - Usina eólica de Formosa localizada em Camocim-Ce.



Fonte: Hely Falcão Maia Neto (2012).

Em Icapuí está prevista a instalação do complexo eólico denominado Santo Inácio, que será constituído por seis usinas eólicas interligadas que juntas terão capacidade de produzir 124 (MWh) de potência, composto por 62 aerogeradores de 2,0 (MWh) programada para iniciar as operações no ano de 2015.

1.1 Estruturação dos Capítulos

Este tópico tem como objetivo principal auxiliar o leitor na identificação do tema abordado, relatar um breve resumo sobre cada capítulo, facilitando o acompanhamento e proporcionando uma fácil compreensão sobre a estruturação deste. Os capítulos foram desenvolvidos numa seqüência gradativa e lógica demonstrando desde a fase inicial todo o detalhamento procedimental durante as diversas etapas de sua execução.

No capítulo dois, são explanados os fatores que motivaram a existência deste trabalho, os objetivos pretendidos e a importância desta Dissertação de Mestrado para a sociedade.

O capítulo três é dedicado à revisão bibliográfica, onde é citado em ordem cronológica o histórico dos trabalhos que serviram de base para fundamentação didática e científica. No capítulo quatro, são mostrados os princípios teóricos, as equações fundamentais da função de distribuição da curva de Weibull e sua aplicabilidade no desenvolvimento da pesquisa. A metodologia empregada é o tema do capítulo cinco que informa como foram adquiridos os dados anemométricos, o modo no qual os dados foram agrupados, quais os métodos numéricos selecionados e os testes estatísticos utilizados para a validação e análise comparativa da eficiência dos métodos.

O capítulo seis mostra os gráficos e as tabelas geradas nas bases mensal e anual, obtidos a partir dos dados coletados de velocidade dos ventos e de potência eólica das cidades de Icapuí (2010) e Camocim (2005).

A parte final do trabalho é dedicada às conclusões relevantes que foram comprovadas segundo as análises estatísticas realizadas. A penúltima seção foi reservada para as referências bibliográficas existentes na comunidade científica sobre a disciplina que permitiram a consulta, formulação teórica e embasamento técnico-científico. A seção final foi destinada à inclusão de anexos contendo informações pertinentes ao assunto abordado e que servem de consulta e apoio técnico.

1.2 Justificativa

Este trabalho é de grande relevância para o desenvolvimento sustentável da economia do Estado do Ceará, pois explica um estudo sobre a eficiência no aproveitamento dos

seus recursos naturais, colocando-o como destaque nacional na utilização de fontes de energias limpas e seguras. Icapuí e Camocim possuem características peculiares privilegiadas, propícias para instalação de usinas eólicas. Identificar o perfil de distribuição dos ventos possibilitará estimar com maior acuracidade o potencial eólico existente.

O contínuo crescimento de projetos no setor aumentará a disponibilidade do insumo, já que a demanda é crescente e encontra-se próxima da oferta, evitando um futuro “colapso” energético. Outro fato motivador trata-se da busca pela independência energética do Estado, haja vista que o mesmo é altamente dependente das importações provenientes das regiões adjacentes que detêm usinas hidroelétricas (TABELA 2).

Tabela 2 – Fluxo de consumo de eletricidade no Ceará – (1993 a 2007)

| | GWh | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Fluxo | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 |
| Produção | 28 | 34 | 21 | 28 | 17 | 24 | 28 | 46 | 68 | 66 | 478 | 1.705 | 559 | 336 | 170 |
| Importação | 4.083 | 4.179 | 4.690 | 5.107 | 5.590 | 6.221 | 6.428 | 6.727 | 6.094 | 6.325 | 6.751 | 7.018 | 7.594 | 7.778 | 8.257 |
| Exportação | -6 | -7 | -6 | -7 | -11 | -9 | -8 | -21 | -11 | -10 | -8 | -5 | -3 | 0 | 0 |
| Var. Est. Perdas e Ajustes* | -541 | -583 | -677 | -706 | -829 | -849 | -747 | -928 | -795 | -881 | -1.339 | -2.578 | -1.582 | -1.392 | -1.227 |
| Consumo Total | 3.563 | 3.624 | 4.027 | 4.422 | 4.768 | 5.387 | 5.700 | 5.824 | 5.356 | 5.500 | 5.883 | 6.140 | 6.568 | 6.722 | 7.201 |
| Consumo Final | 3.563 | 3.624 | 4.027 | 4.422 | 4.768 | 5.387 | 5.700 | 5.824 | 5.356 | 5.500 | 5.883 | 6.140 | 6.568 | 6.722 | 7.201 |
| Consumo Final Energético | 3.563 | 3.624 | 4.027 | 4.422 | 4.768 | 5.387 | 5.700 | 5.824 | 5.356 | 5.500 | 5.883 | 6.140 | 6.568 | 6.722 | 7.201 |
| Setor Energético | 10 | 9 | 9 | 9 | 12 | 10 | 10 | 8 | 8 | 7 | 8 | 18 | 10 | 10 | 11 |
| Residencial | 1.097 | 1.142 | 1.322 | 1.509 | 1.657 | 1.883 | 1.963 | 1.983 | 1.730 | 1.666 | 1.806 | 1.914 | 2.063 | 2.140 | 2.317 |
| Comercial | 579 | 600 | 678 | 771 | 835 | 946 | 1.003 | 1.065 | 969 | 998 | 1.077 | 1.114 | 1.189 | 1.246 | 1.330 |
| Público | 448 | 491 | 505 | 553 | 586 | 680 | 757 | 762 | 687 | 742 | 806 | 838 | 890 | 916 | 956 |
| Agropecuário | 248 | 195 | 219 | 244 | 291 | 346 | 338 | 296 | 327 | 403 | 514 | 482 | 559 | 573 | 643 |
| Industrial | 1.180 | 1.186 | 1.295 | 1.336 | 1.388 | 1.522 | 1.630 | 1.710 | 1.635 | 1.684 | 1.673 | 1.775 | 1.857 | 1.837 | 1.944 |
| Cimento | 67 | 71 | 99 | 103 | 116 | 119 | 122 | 149 | 145 | 139 | 129 | 133 | 164 | 165 | 172 |
| Ferro-Gusa e Aço | 190 | 182 | 163 | 117 | 115 | 145 | 152 | 86 | 77 | 78 | 101 | 129 | 143 | 144 | 185 |
| Química | 26 | 27 | 44 | 39 | 31 | 37 | 30 | 44 | 39 | 50 | 43 | 52 | 53 | 57 | 59 |
| Alimentos e Bebidas | 164 | 167 | 198 | 209 | 212 | 228 | 236 | 235 | 225 | 244 | 265 | 275 | 272 | 281 | 295 |
| Têxtil | 530 | 527 | 548 | 600 | 616 | 633 | 688 | 706 | 683 | 692 | 634 | 637 | 656 | 632 | 660 |
| Papel e Celulose | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 16 | 19 | 21 | 18 | 21 | 28 | 32 | 34 | 31 | 31 |
| Cerâmica | 41 | 43 | 61 | 63 | 71 | 73 | 75 | 91 | 89 | 85 | 79 | 82 | 100 | 101 | 105 |
| Outros | 155 | 160 | 175 | 197 | 215 | 269 | 308 | 378 | 359 | 373 | 393 | 433 | 435 | 424 | 437 |

Fonte: Balanço Energético do Estado do Ceará (BEECE, 2008).

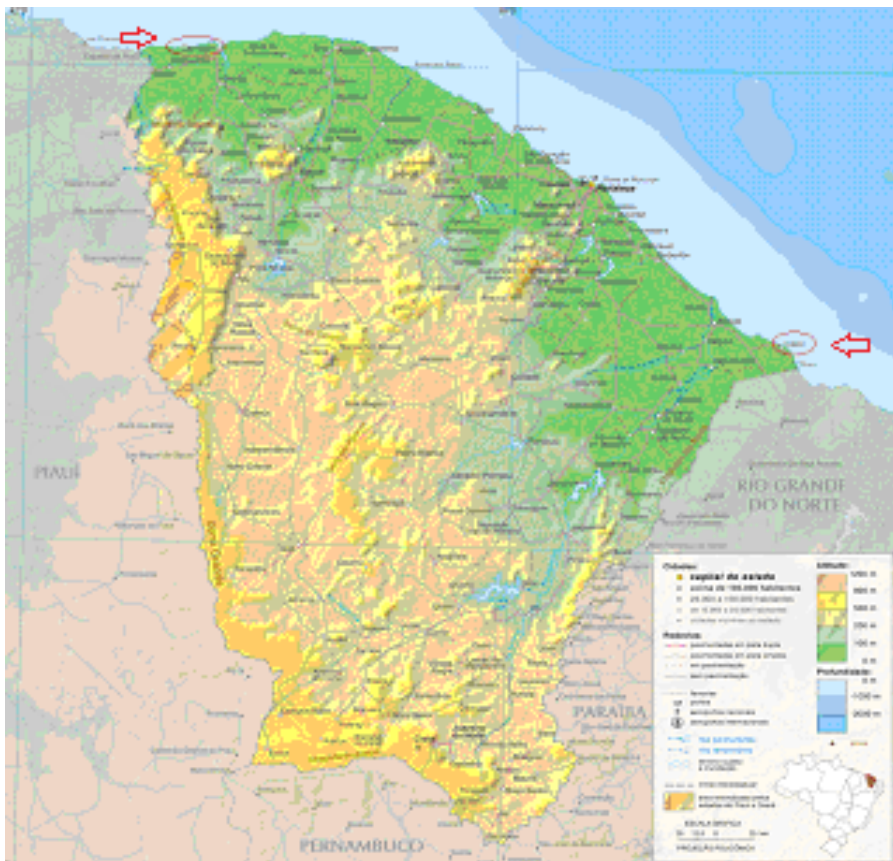
Este trabalho cooperará no sentido de fornecer informações que ajudarão a estabelecer diretrizes governamentais de longo prazo buscando à auto-sustentabilidade da economia, incremento na oferta de trabalho e renda, desenvolvimento tecnológico, descentralização da economia e benefícios sociais oriundos de planejamentos estratégicos bem fundamentados.

1.3 Localização Geográfica – Icapuí e Camocim

Icapuí está situada na costa leste do Estado do Ceará, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude $4^{\circ} 42' 4''$ longitude $37^{\circ} 21' 19''$, tendo como limítrofes ao norte Aracati, ao sul o Estado do Rio Grande do Norte, a leste o Oceano Atlântico e a oeste por Itaiçaba.

Camocim pertence à costa noroeste do Estado e possui o seguinte posicionamento: latitude $2^{\circ} 54' 08''$ longitude $40^{\circ} 50' 28''$, sendo delimitada ao norte pelo Oceano Atlântico, ao sul pelo município de Granja, a leste por Jijoca e a oeste pelo município de Barroquinha.

Figura 5 – Mapa geográfico do Estado do Ceará



Fonte: Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2012).

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo analisar e comparar sete métodos numéricos para sugerir qual o método mais eficiente na determinação dos coeficientes da curva de distribuição de probabilidades de Weibull através dos dados de velocidade do vento e de potência eólica das cidades litorâneas de Camocim e Icapuí pertencentes à região Nordeste do Brasil. Os dados anemométricos levantados nestas áreas foram coletados no período de janeiro a dezembro dos anos de 2005 e 2010, sendo agrupados nas bases mensal e anual.

Os objetivos específicos são:

a) Estimar os parâmetros de forma (k) e de escala (c) para as duas cidades pesquisadas, num período compreendido de doze meses ininterruptos.

b) Verificar a semelhança ou proporcionalidade ao comparar os índices gerados a partir dos dados de velocidade do vento com potência eólica, identificando qual o mais preciso e exato.

c) Averiguar a ocorrência de possíveis discrepâncias nos resultados produzidos a partir dos elementos de potência eólica através dos testes estatísticos.

Com os itens acima sendo atingidos, pretende-se colaborar com o fornecimento de informações imprescindíveis na formulação dos cálculos sobre o potencial energético de diferentes regiões geográficas do globo terrestre com perfis equivalentes. Consequentemente, contribuir-se-á no processo de realização de planejamento estratégico ligado a estudos sobre implementação de projetos correlatos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O teste do Qui-quadrado foi proposto por Karl Pearson (1900) habitualmente empregado em procedimentos estatísticos, informa a medida com que os valores medidos se desviam do valor esperado, caso as duas variáveis não estejam correlacionadas.

Fisher (1915) formulou os conceitos iniciais básicos que originaram a aplicação da distribuição de frequências de Weibull aos dados de velocidade do vento, confirmando que dependendo da amostra selecionada obtêm-se diferentes valores e qual dentre estes será o mais provável para a população considerada.

Já Herbert Sturges (1926) desenvolveu técnicas matemáticas para calcular o número de classes de frequência em modelos estatísticos com grande quantidade de amostras. Os intervalos existentes para cada conjunto de observações podem ser calculados de forma direta através da Equação (21).

Entretanto, Hennessey (1977) examinou minuciosamente as propriedades da distribuição de Weibull, observando que existe uma estreita relação entre os momentos da velocidade do vento e os parâmetros de forma e de escala. O autor também verificou que a partir de alguns dados estatísticos como velocidade média e desvio padrão poder-se-ia estimar o potencial energético baseado em uma série temporal.

Justus e Mikhail (1978) sugeriram a utilização do método do momento quando a média e o desvio padrão dos dados de velocidade do vento estão disponíveis. Este método baseia-se em iterações numéricas de duas equações estruturais. A idéia principal da teoria é aproximar o momento populacional do momento amostral através de estimadores estatísticos.

Já Stevens e Smulders (1979) propuseram a utilização do método da máxima verossimilhança como uma nova alternativa a ser empregada em pesquisas sobre a disciplina. Para resolução deste método, é preciso introduzir iterações numéricas para calcular os coeficientes pretendidos.

Deaves e Lines (1997) apresentaram o método gráfico fundamentado no método matemático dos mínimos quadrados desenvolvido por Gauss. De acordo com os autores, este

pode ser utilizado com bom nível de confiabilidade quando os dados anemométricos possuem pequenos valores absolutos.

Dorvlo (2002) comparou e avaliou o método gráfico com o método do momento através do teste do Qui-quadrado a partir dos dados adquiridos de quatro localidades de Oman. Em sua análise, o autor concluiu que o método proposto era o mais indicado de acordo com os índices apresentados. Constatou, também, que o teste sugerido foi satisfatório para analisar os erros de aproximação entre as variáveis.

Por outro lado, Celik (2003) realizou um estudo comparativo entre as funções de distribuição de probabilidades de Weibull e Rayleigh em distintas regiões da Turquia. Os dados utilizados foram agrupados em médias horárias na base mensal, coletados na altura de dez metros acima do nível do mar. Ele concluiu que o primeiro modelo foi mais preciso em detrimento ao segundo na avaliação ocorrida.

Silva (2003) desenvolveu o método da energia equivalente que permite uma simplificação matemática implicando numa equação de apenas um parâmetro, podendo ser solucionada através de um estimador baseado no método dos mínimos quadrados de Gauss. Para as condições naturais existentes na Região Nordeste do Brasil, o autor afirma que oferece diversas facilidades em sua aplicabilidade como: adaptado para a região, rapidez nos cálculos e eficácia nos resultados.

Akpinar (2004) realizou estudos para dimensionar o potencial eólico da região de Maden-Elazig, Turquia, adotando o método gráfico para tal finalidade. Para validar seu experimento, selecionou os testes do Qui-quadrado, *RMSE* e análise de variância. Ele comparou, também, nesta oportunidade o modelo de distribuição de frequência de Weibull com o de Rayleigh. Segundo o autor, o modelo de Weibull foi o mais exato e assertivo.

Zhou (2005) realizou um estudo sobre as características do vento em quatro localidades na região do Delta do Rio Pérola na China, agrupando dados de velocidade média horária do vento na base mensal. Os parâmetros da curva de distribuição de Weibull foram determinados através do método empírico. O autor alerta sobre a necessidade de realizar uma análise criteriosa durante a etapa de planejamento envolvendo projetos de instalação de parques

eólicos industriais. Enfatiza ainda, a importância de averiguar as variações meteorológicas que ocorrem no meio-ambiente durante as quatro estações climáticas.

Akdag & Dinler (2009) propuseram o método da energia padrão como uma opção apropriada para estimar os parâmetros de forma e de escala da distribuição de Weibull. De acordo com suas conclusões, os autores afirmaram que o método da energia padrão obteve um comportamento estável, colaborando para esta validação os testes de análise de variância, *RMSE* e erro da potência.

Chang (2011) analisou seis métodos numéricos para estimar os parâmetros da curva de Weibull a partir de dados de velocidade dos ventos, dentre estes: método gráfico, método da máxima verossimilhança, método da máxima verossimilhança modificado, método empírico, método do momento e método da energia padrão. Ele assegurou que os métodos que utilizam iterações numéricas para sua resolução obtiveram maior eficácia. Para certificar seus experimentos, o autor utilizou os testes *RMSE* e erro da potência.

Posteriormente, Sousa (2011) realizou um estudo comparativo entre sete métodos numéricos, acrescentando o método da energia equivalente aos seis métodos propostos anteriormente por Chang (2011), utilizando somente dados de velocidade do vento. Para analisar estatisticamente, o autor considerou os seguintes testes: análise de variância, raiz quadrada dos erros quadráticos médios, teste do Qui-quadrado e análise de potência. Ele concluiu que o método da energia equivalente obteve um melhor ajuste no âmbito geral.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 A Distribuição de Weibull

A velocidade do vento é um parâmetro indispensável para se mensurar o potencial eólico de uma localidade. Para realizar este dimensionamento, torna-se necessário utilizar o estudo de séries temporais. Os registros devem ser captados junto às torres anemométricas instaladas em pontos estratégicos de coleta, considerando-se: interferências físicas, altitude local, representatividade sobre a extensão territorial e facilidade de acesso para monitorar e intervir na manutenção dos equipamentos.

A base de dados anemométricos das cidades de Camocim-Ce e Icapuí-Ce foi levantada pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará (SEINFRA), e pela Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME) no período compreendido entre os meses de janeiro a dezembro dos anos 2005 e 2010 respectivamente. Para o presente estudo, também foram obtidos os registros de potência eólica a partir da resolução de suas equações representativas.

Weibull propôs uma distribuição de frequências para descrever a vida útil de materiais e equipamentos sujeitos a esforços de fadiga e cargas que poderiam provocar a fratura dos mesmos. A teoria formulada pelo autor utiliza a abordagem do componente mais frágil para indicar a resistência mecânica dos materiais, onde as propriedades mecânicas do elo mais frágil definem a carga máxima de tensão que os elementos pertencentes à mesma cadeia podem ser submetidos sem que haja o rompimento. Ghosh (1999) afirmou que haverá um valor medido que será mínimo a partir de um conjunto de valores possíveis e que se os testes são repetidos outros mínimos serão novamente encontrados, portanto a resistência medida pode ser considerada uma variação dos resultados destas funções.

A função densidade de probabilidades de Weibull $f(v)$ e a função cumulativa de distribuição $F(v)$ são encontradas através das equações matemáticas (1) e (2):

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

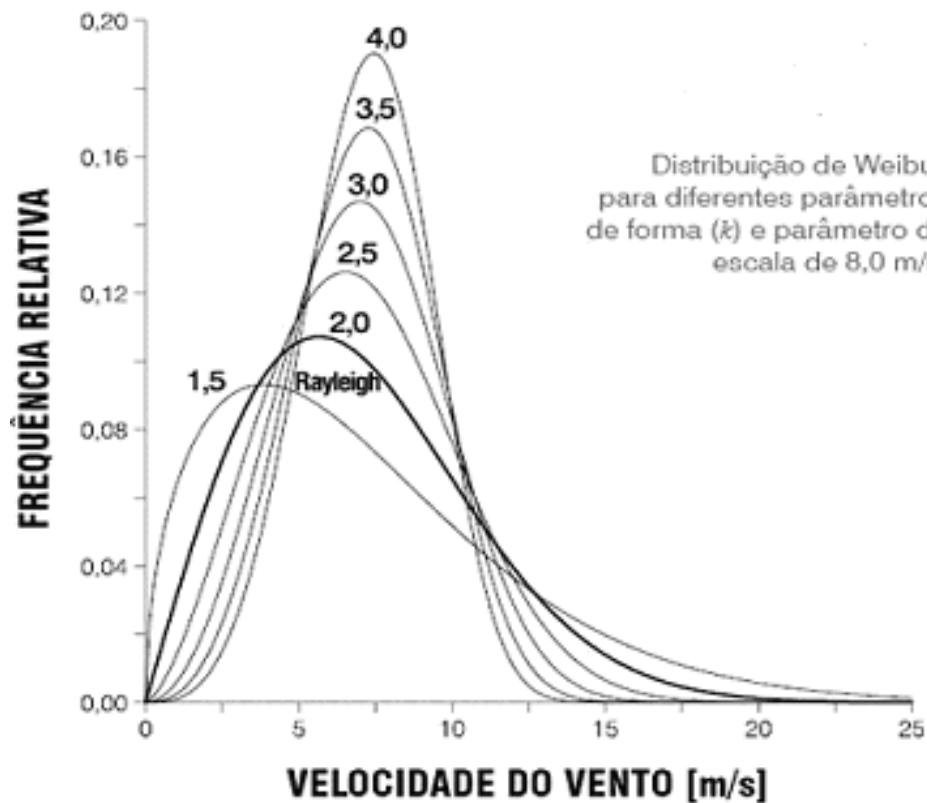
$$F(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

Onde (k) é o parâmetro de forma, sendo adimensional, (c) é o parâmetro de escala em (m/s) e (v) é a velocidade medida do vento (m/s).

Se oscilações bruscas são raras e há predominância de ventos calmos e moderados, pode-se utilizar a distribuição de Weibull para quantificar a probabilidade da ocorrência de velocidades médias em intervalos periódicos. O valor de k demonstra quão pontiaguda é a curva característica, ou seja, o grau de sua variabilidade (FIGURA 6).

O parâmetro de escala indica o “formato” do vento (velocidade média) em relação a seu módulo vetorial. Entretanto, elevadas amplitudes de k revelam maior constância, com menor ocorrência de extremos.

Figura 6 – Distribuição de Weibull para diferentes valores de k



Fonte: Atlas Eólico do Estado do Espírito Santo.

Para cada valor de k haverá uma configuração geométrica específica, quando $k = 1,5$ o gráfico é denominado de distribuição exponencial, para $k = 2,0$ passa a ser chamada de Rayleigh. Os projetistas de turbinas de aerogeradores geralmente adotam o valor para $k = 2,0$ para atender a situações mais críticas e severas com elevado grau de variabilidade.

Em geral, nas séries temporais anuais de velocidade do vento, k situa-se entre 2,0 e 3,0. Excepcionalmente pode atingir valores superiores a 6,0 como nas regiões predominantes de ventos alísios, como o Nordeste brasileiro (PESSANHA, 2009).

Estes parâmetros podem ser modelados matematicamente por vários métodos numéricos. Diante da literatura exposta, para este estudo foram escolhidos o método empírico, método da energia padrão, método gráfico, método do momento, método da máxima verossimilhança, método da máxima verossimilhança modificado e método da energia equivalente, sendo analisados e confrontados objetivando definir aquele que melhor se adéqua às particularidades dos territórios avaliados.

4.2 Métodos numéricos para estimar os parâmetros k e c

4.2.1 Método Empírico

É um método de resolução efetiva e clara, sendo necessário o conhecimento da velocidade média e do desvio padrão dos dados coletados. Substituem-se, então, estes valores diretamente numa relação empírica pré-estabelecida.

$$k = \left(\frac{\sigma}{v} \right)^{-1,086} \quad (3)$$

Onde: (σ) é o desvio padrão, Equação (4).

$$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (v_i - \bar{v})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

A variável (N) é o número de observações, (\bar{v}) a velocidade média do vento em (m/s), Equação (5).

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N vi \quad (5)$$

Após encontrar o parâmetro k , calcula-se c , Equação (6).

$$\bar{v} = c \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad (6)$$

A função gamma (Γ) é descrita por:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} s^{x-1} \exp(-s) ds \quad (7)$$

4.2.2 Método da Energia Padrão

Utiliza-se a velocidade cúbica média e a velocidade média elevada ao cubo do vento (Akdag & Dinler, 2009) para encontrar o fator padrão de energia (E_{pf}), sendo seu efeito um número adimensional.

$$E_{pf} = \left(\frac{\bar{v}^3}{\frac{-3}{v}} \right) \quad (8)$$

O parâmetro k é fornecido ao substituir (E_{pf}) na Equação (9).

$$k = 1 + \frac{3,69}{(E_{pf})^2} \quad (9)$$

Este método relaciona a velocidade média do vento com o coeficiente c , conforme proposto na Equação (10).

$$\bar{v} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (10)$$

4.2.3 Método Gráfico

Neste sistema, a função cumulativa de distribuição $F(v)$ é modificada devido à inserção de um duplo logaritmo, Equação (11).

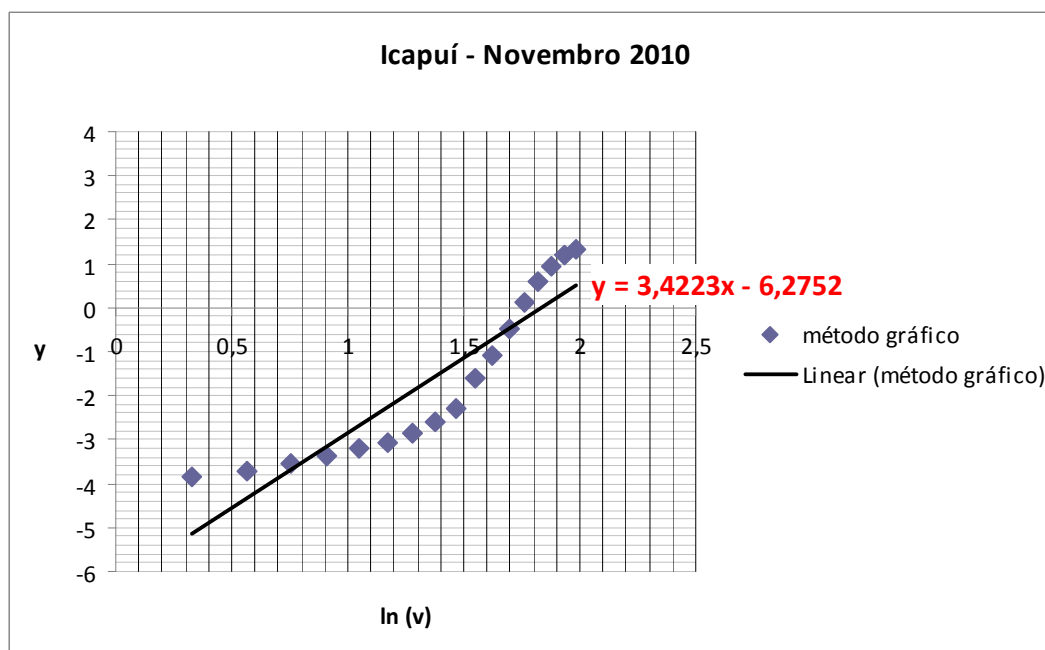
$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} = k \cdot \ln(v) - k \cdot \ln(c) \quad (11)$$

Esta equação originará um conjunto de pares ordenados (x, y) , onde os valores da abcissa são dados por $\ln(v)$ e os valores da ordenada por:

$$\ln\{-\ln[1 - F(v)]\} \quad (12)$$

Utilizando o conceito do método dos mínimos quadrados de Gauss é possível traçar também uma reta de tendência; o parâmetro de forma será o coeficiente angular desta.

Figura 7 – Método Gráfico Icapuí – Novembro 2010



Fonte: Hely Falcão Maia Neto (2012).

O gráfico (FIGURA 7) representa a reta de tendência ajustada, definida por uma função matemática linear do tipo:

$$y = a.x + b \quad (13)$$

Igualando o segundo membro da Equação (11) com a Equação (13) resulta:

$$y = a.x + b = k.\ln(v) - k.\ln(c) \quad (14)$$

Fazendo: $k = a$, $x = \ln(v)$ e $b = k.\ln(c)$, pode-se expressar o valor de c através da Equação (15):

$$c = e^{\left(\frac{-b}{a}\right)} \quad (15)$$

Onde (e) representa a constante de Néper.

4.2.4 Método do Momento

O método do momento foi sugerido por Justus e Mikhail (1978). É recomendado quando a média e o desvio padrão dos elementos são inicialmente conhecidos e estão em escala apropriada. Para encontrar o valor de k , executa-se a iteração numérica das Equações (16) e (17).

$$\bar{v} = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (16)$$

$$\sigma = c \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Dividindo a Equação (17) pela Equação (16), obtém-se a Equação (18) cuja única variável é k , simplificando a solução.

$$\left(\frac{\sigma}{v}\right) = \left[\frac{\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

4.2.5 Método da Máxima Verossimilhança

O conceito básico da máxima verossimilhança foi proposto pioneiramente por Fisher (1915). Foi introduzido para aplicação de dados de velocidade do vento por Stevens e Smulders (1979). Baseia-se na resolução indireta da Equação (19) através do uso de técnicas de iteração numérica para encontrar k , tratando-se, portanto de um procedimento mais complexo e laborioso, porém muito eficaz.

A solução desse sistema envolve o emprego de uma matemática não trivial, em geral, não é facilmente obtida, exigindo frequentemente métodos numéricos sofisticados e sistemas de computação avançados.

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^N 1 \cdot v_i^k \ln(v_i)}{\sum_{i=1}^N 1 \cdot v_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N 1 \cdot \ln(v_i)}{N} \right]^{-1} \quad (19)$$

Após a resolução da Equação (19), de posse do valor de k , o parâmetro de escala é calculado através da Equação (20).

$$c = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N v_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (20)$$

Onde (v_i) representa o valor da velocidade do vento medido em cada intervalo de tempo (i) , (N) o número de observações.

4.2.6 Método da Máxima Verossimilhança Modificado

Este método somente pode ser apreciado se os dados disponíveis de velocidade do vento já estiverem no formato da distribuição de Weibull (CHANG, 2011).

Os elementos são divididos em intervalos, sendo usada a frequência relativa da velocidade no intervalo $f(v_i)$, o número de intervalos (n) e (v_i) o valor da velocidade medido no intervalo (i) .

O valor de n é obtido através da Equação (21). A metodologia para este sistema é semelhante à de seu precursor, envolvendo também a aplicação de iteração numérica para alcançar os fatores pretendidos.

$$n = \frac{(v \max)}{(3,3 \cdot \ln(N) + 1)} \quad (21)$$

Onde $(v \max)$ é a velocidade máxima presente na população amostral.

Para achar k realiza-se iteração numérica a partir da Equação (22).

$$k = \left[\frac{\sum_{i=1}^n 1 \cdot v_i^k \ln(v_i) \cdot f(v_i)}{\sum_{i=1}^n 1 \cdot v_i^k \cdot f(v_i)} - \frac{\sum_{i=1}^n 1 \cdot \ln(v_i) \cdot f(v_i)}{f(v > 0)} \right]^{-1} \quad (22)$$

Enquanto c é estimado através da Equação (23).

$$c = \left[\frac{1}{f(v > 0)} \cdot \sum_{i=1}^n v_i^k \cdot f(v_i) \right]^{\frac{1}{k}} \quad (23)$$

Onde $f(v > 0)$ é a probabilidade da velocidade do vento ser superior a zero.

4.2.7 Método da Energia Equivalente

Nesta metodologia, os dois parâmetros de Weibull são alcançados a partir da equivalência da densidade de energia da curva teórica e da densidade de energia das observações, permitindo uma fatoração matemática que acarreta numa equação com apenas uma variável, k , desenvolvida a partir de um estimador de mínimos quadrados. O mesmo é calculado por meio de iterações numéricas na Equação (24), o parâmetro c é encontrado por intermédio da Equação (25).

Além de adaptado às condições de vento da região Nordeste, este novo método apresenta rapidez na sua execução, pois os cálculos são baseados em histogramas de velocidade e não somente nas ocorrências individuais.

$$\sum_{i=1}^n \left[Wv_i - e \frac{\left[(v_i-1)\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^k}{(vm^3)^{\frac{1}{3}}} + e \frac{\left[(v_i)\Gamma\left(1+\frac{3}{k}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^k}{(vm^3)^{\frac{1}{3}}} \right]^2 = \sum_{i=1}^n (\varepsilon v_i)^2 \quad (24)$$

$$c = \left[\frac{vm^3}{\Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (25)$$

Onde (Wv_i) é a frequência de ocorrência de velocidade do vento no i -ésimo intervalo de tempo (i) , (n) o número de intervalos, (v_i) o valor do limite superior do i -ésimo intervalo de velocidade, (vm^3) a velocidade cúbica média das amostras e $(\varepsilon v_i)^2$ a soma dos quadrados dos erros de aproximação.

4.3 Análise Estatística dos resultados

Diagnosticar a proficiência dos métodos numéricos abordados é fundamental, portanto, para ratificar a eficiência dos mesmos torna-se necessário verificar estatisticamente os índices concebidos. Três testes distintos e notórios são destinados para este propósito: teste do Qui-quadrado, raiz quadrada dos erros quadráticos médios e análise de variância.

4.3.1 Teste do Qui-quadrado (X^2)

É recomendado para analisar proporções de variáveis independentes, ou seja, possíveis divergências entre as frequências observadas e as frequências esperadas para os eventos experimentados. Não é oportuno para certificar fenômenos com pequena quantidade de amostras, inferior a vinte indivíduos. Representado pelo símbolo (X^2), é definido pela Equação (26).

É um teste não paramétrico, independe de fatores populacionais como média e variância, evidentemente, pode-se afirmar que dois grupos se comportam de forma semelhante se as diferenças entre as frequências de cada categoria forem irrisórias, próximas à zero.

Segundo Souza (2011), para este modelo as seguintes proposições precisam ser atendidas:

- a) Os grupos serem independentes.
- b) Os itens de cada grupo selecionados aleatoriamente.
- c) As observações devem ser de frequências ou contagens.
- d) Cada observação pertence a somente uma categoria.

$$X^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - x_i)^2}{N - n'} \quad (26)$$

Onde (N) é o número de observações, (y_i) a frequência relativa das observações, (x_i) a frequência relativa de Weibull e (n') o número de constantes analisadas.

4.3.2 Teste RMSE

A raiz quadrada dos erros quadráticos médios é uma análise de previsão, informa o grau de dispersão de duas variáveis correlatas em torno de um valor médio esperado, conforme Equação (27). Quanto menor for o seu valor, assim será o desvio, relata à ocorrência de equívocos, conseqüentemente, pequenos valores apontam maior confiabilidade nos resultados dos elementos avaliados.

O erro ocorre devido à aleatoriedade ou informações que foram descartadas indevidamente durante o levantamento dos dados.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

4.3.3 Análise de Variância (R^2)

Utilizado para verificar a variância de experimentos submetidos a diferentes tratamentos e analisar a existência de diferenças significativas entre as médias dos coeficientes.

Algumas premissas devem ser satisfeitas:

- a) A variável aleatória deve ser contínua.
- b) Os grupos devem ser independentes.
- c) Os dados podem ser de origem quantitativa ou qualitativa.

O coeficiente R^2 é uma medida da capacidade do método em relação à habilidade de estimar corretamente as variáveis, Equação (28).

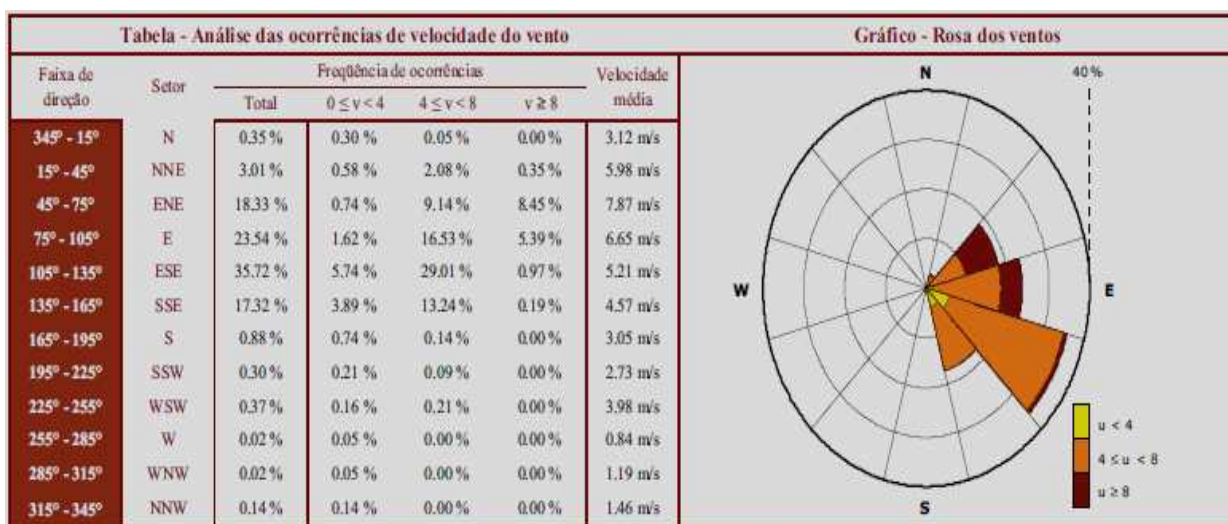
$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2 - \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - z_i)^2} \right] \quad (28)$$

Onde (z_i) é a frequência relativa média das observações.

5 METODOLOGIA

Segundo dados da SEINFRA-CE (2008), a ocorrência de ventos no Estado do Ceará durante os meses de Março e Abril, ápice do período chuvoso, predominam ventos oriundos do leste-sudeste (ESE) direção (105° - 135°) e leste (E) direção (75° - 105°) no horário diurno, passando a sul-sudeste (SSE) direção (135° - 165°) durante a noite (FIGURA 8).

Figura 8 – Distribuição dos ventos em Camocim - Abril 2005



Fonte: SEINFRA-CE (2008).

Este comportamento está associado à posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e à contribuição das brisas terrestres. Sem a presença da ZCIT, a estabilidade térmica da atmosfera se torna mais neutra ou estável, e o gradiente vertical de velocidade de vento atinge seus valores mais elevados especialmente à noite, pelo efeito de rugosidade continental associado à direção sudeste (SE) (brisas terrestres). Gradativamente nos meses seguintes, o vento se torna mais intenso, especialmente ao longo do dia.

No período de Setembro-Dezembro, tanto os ventos alísios quanto as brisas marinhas se intensificam, e ao longo dos dias e noites sopram ventos quase constantes, predominando velocidades superiores a 10 m/s (a partir de 40m de altura). Devido ao continente mais aquecido do que o oceano, os ventos de quadrante leste-nordeste (E-NE) atingem a costa oriunda da baixa rugosidade marítima, com baixa turbulência.

5.1 Aquisição dos dados anemométricos

Foram adquiridos registros anemométricos a alturas correspondentes a 10,0 e 20,6 metros, no intervalo abrangido por 365 dias dos anos de 2010 e 2005 para as cidades de Icapuí e Camocim, sequencialmente. Os prontuários foram gentilmente cedidos pela Fundação Cearense de Meteorologia e pela Secretaria de Infraestrutura do Estado do Ceará. Os referidos órgãos públicos estaduais dispõem de torres anemométricas instaladas e mantidas por equipes técnicas orgânicas especializadas que visitam periodicamente suas estações meteorológicas. O dia Juliano, o horário, a pressão atmosférica, a umidade relativa do ar, a direção do vento, a temperatura terrestre e a radiação solar também foram monitorados pela FUNCEME durante as observações efetuadas.

Figura 9 – Modelo de Anemômetro utilizado pela FUNCEME (2012)



Fonte: FUNCEME (2012).

5.2 Validação e condicionamento dos dados levantados

Os arquivos contendo os elementos anemométricos são inicialmente armazenados em bancos de memória agregados aos equipamentos, posteriormente são disponibilizados através de periféricos de saída. Os valores de velocidade do vento e de potência eólica média foram considerados na base horária, calculada em intervalos de dez minutos, ininterruptamente no horário das 00h00min às 24h00min. Para calcular a densidade de potência eólica, deve ser utilizada a Equação (28).

$$PE = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \right) \quad (28)$$

Onde (ρ) é a densidade relativa do ar, em condições normais de temperatura e pressão é igual a 1.2928 (kg/m³) e (v) a velocidade média do vento (m/s).

Ao multiplicar a Equação (28) pelo valor da área de secção transversal circunvizinha obtêm-se a potência total gerada em (kW).

Dispondo do valor da velocidade média horária (vh), é possível adquirir a densidade de potência eólica média horária (PEh), substituindo-se a variável (v) por (vh) na Equação (29).

$$PEh = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot vh^3 \right) \quad (29)$$

Os dados de velocidade média horária são extraídos na forma bruta sem a devida formatação para manipulá-los em programas de cálculo eletrônico e gerador de gráficos. Torna-se imprescindível condicioná-los, portanto, são inseridos parâmetros de calibração, parâmetros de montagem e de correção. A validação é feita por inspeção automática excluindo dados inválidos e falhas de armazenamento do banco de memória.

Para compilar a extensa gama de caracteres acumulada, faz-se necessário automatizar o processo, o *Software* (programa computacional) *Origin Pro 8.6* (versão de demonstração) foi selecionado para este desígnio por oferecer os recursos requeridos.

5.3 Cálculo dos parâmetros k e c

Os parâmetros k e c foram calculados individualmente para o conjunto de métodos numéricos especificados nesta Dissertação, seja por meio da aplicação direta das respectivas equações matemáticas que os concebem, ou de forma indireta para aqueles que necessitam de técnicas iterativas. Uma solução muito comum é a utilização do algoritmo de Newton-Raphson recorrentemente solicitado pela comunidade científica.

Os parâmetros são dispostos em tabelas representativas com o intuito de oferecer uma conferência desembaraçada, ágil e segura.

As análises comparativas estatísticas foram praticadas com os dados dispostos de forma sequencial e metódica, minimizando-se falhas em virtude da ausência de organização. A Tabela (3) exemplifica um modelo de planilha congênere as que serão admitidas no capítulo seguinte.

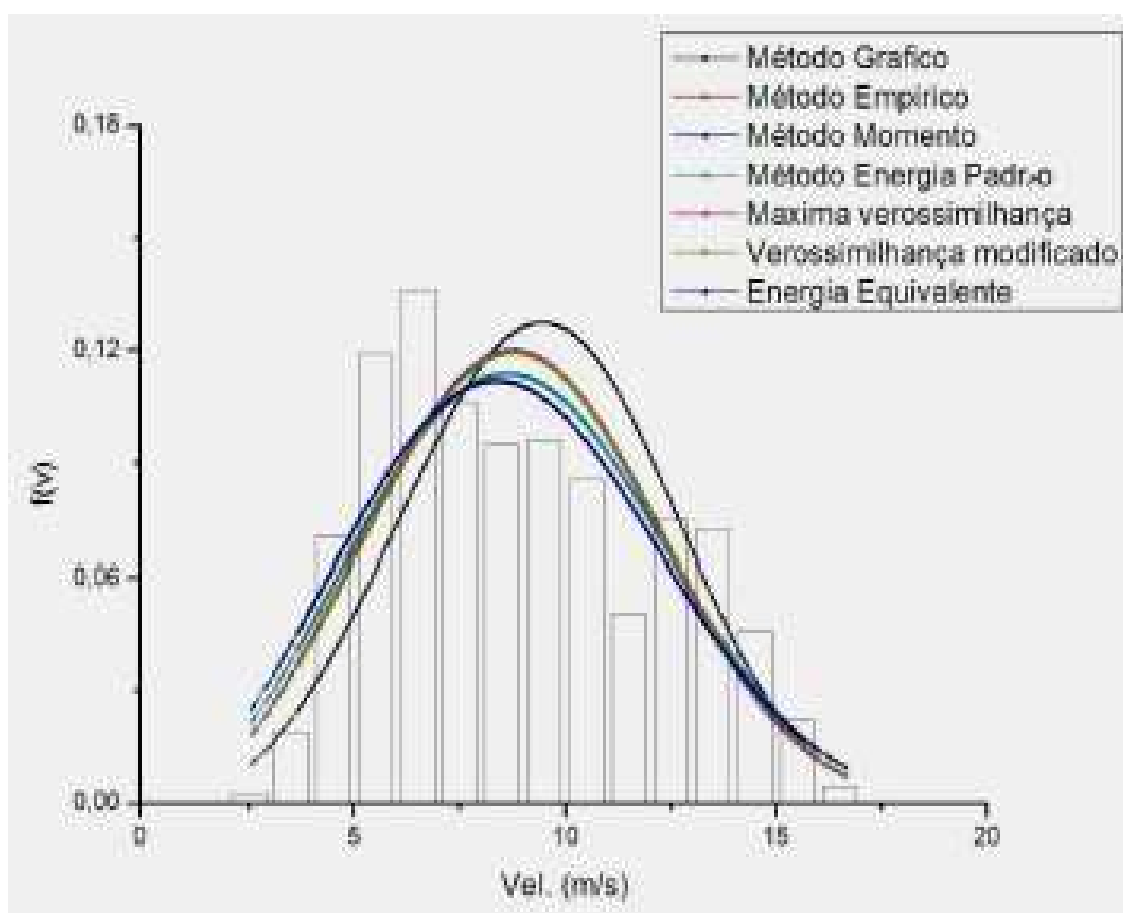
Tabela 3 – Análise Estatística – Paracuru Agosto 2004

| PARACURU – AGOSTO 2004 | | | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------|---|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 5,811160 | 10,720270 | 0,040750 | 0,0017200000 | 0,958540 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,960350 | 10,959080 | 0,029860 | 0,0009244590 | 0,981000 |
| GRÁFICO | 6,099000 | 10,480000 | 0,044100 | 0,0020200000 | 0,981000 |
| MOMENTO | 5,862500 | 10,715010 | 0,041170 | 0,0017600000 | 0,963860 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 5,833400 | 10,747000 | 0,040870 | 0,0017300000 | 0,964390 |
| MÁXIMA VER. MODIFICADO | 5,847600 | 10,744500 | 0,040990 | 0,0017400000 | 0,964190 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 5,510000 | 10,713090 | 0,038440 | 0,0015300000 | 0,968500 |

Fonte: Dissertação de Mestrado de Ricardo Coelho de Souza (2011).

É importante ressaltar a premência de representar graficamente os efeitos produzidos, pois auxiliam na apreciação e interpretação dos mesmos. São plotadas curvas de distribuição de Weibull, com a seguinte configuração: eixo das abscissas constituído pela velocidade do vento (m/s) e eixo das ordenadas pela frequência relativa de Weibull $f(v)$, conforme (FIGURA 10).

Figura 10 – Distribuição de Weibull – Paracuru Agosto 2004



Fonte: Dissertação de Mestrado de Ricardo Coelho de Souza (2011).

5.4 Análise Comparativa dos resultados

A fase complementar do procedimento trata da execução de análises comparativas entre os métodos numéricos, confrontando-os por meio das técnicas estatísticas apresentadas no capítulo anterior. Serão validados e certificados os sistemas que exibirem excelência nos

índices de desempenho, conforme os conceitos explicitados no transcurso desta pesquisa. Os padrões estabelecidos para classificar progressiva e gradativamente os métodos numéricos, foram os relacionados a seguir:

a) Teste do Qui-quadrado (X^2), o resultado pretendido requer proximidade do número zero, concordante com os padrões estabelecidos na seção 4.3.1.

b) Teste *RMSE*, o valor almejado deve ser o mais próximo possível do número zero, pois assim, menor será o desvio, logo maiores as chances de sucesso, análogo aos requisitos mencionados na seção 4.3.2.

c) Análise da Variância (R^2) demanda que as relações sejam próximas do número um, aquela que estiver menos afastada deste será a mais recomendada implicando afirmar que houve maior exatidão, congênere ostentado na seção 4.3.3.

d) Quando houver diferenças significativas entre os valores dos índices estatísticos gerados para as distintas populações amostrais compostas por dados de velocidade do vento e potência eólica, devem prevalecer os que obtiverem maior grau de exatidão nos cálculos efetivados.

Os resultados das análises comparativas são formulados através da estipulação de uma ordem classificatória (*ranking*) representada nas TABELAS 29, 30, 32 e 33.

6 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, os registros anemométricos são dispostos nas bases mensais e anuais, paulatinamente apresentados os parâmetros k e c calculados para os diferentes métodos numéricos assinalados, consecutivamente gráficos das curvas de distribuição de Weibull correspondentes.

Demonstram-se as incorreções observadas nas inferências estatísticas afinadas com os dados de velocidade do vento e de potência eólica, onde os mesmos são organizados em planilhas eletrônicas inclusas nas seções 6.1 a 6.3.

Na base anual considera-se como população amostral o somatório das populações individuais dos doze intervalos mensais.

A seção 6.3 apresenta planilhas de análise comparativa dos resultados, tendo por objetivo relacionar os métodos numéricos na ordem decrescente de desempenho, fornecendo subsídios para as considerações descritas no capítulo 7.

É proporcionada uma célere visualização dos resultados, introduzindo a aplicação de um recurso didático destinado a auxiliar no processo de análise comparativa, firmando a construção de um *ranking* de graduação. As informações advindas destas tabelas fornecem embasamento técnico-científico na formulação das conclusões e discussões ulteriores sobre o trabalho.

6.1 Curvas e Tabelas mensais – Icapuí 2010

Nesta seção são representados os gráficos mensais dispostos em ordem cronológica para a cidade de Icapuí, abrangendo o período de janeiro a dezembro de 2010. Subsequentemente são apresentadas também tabelas contendo os valores estimados para os parâmetros de forma e de escala da curva de distribuição de frequências de Weibull relacionadas aos respectivos erros estatísticos encontrados.

Figura 11 – Distribuição de Weibull – Icapuí Janeiro 2010

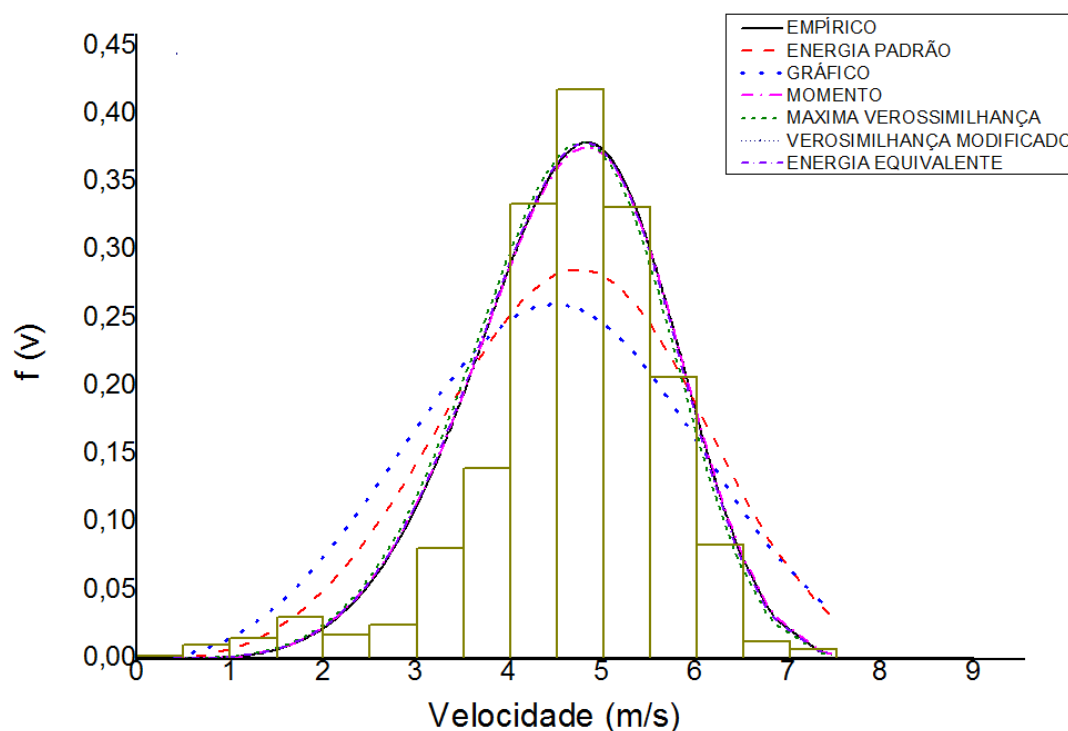


Tabela 4 – Análise Estatística – Icapuí Janeiro 2010

| ICAPUÍ - JANEIRO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 5,10231400 | 5,05386000 | 0,04969284 | 0,02536118 | 0,92851816 | 0,05543368 | 0,03155943 | 0,89737900 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,85108000 | 5,13646000 | 0,04266048 | 0,01869103 | 0,94731834 | 0,04753482 | 0,02320629 | 0,92454000 |
| GRÁFICO | 3,36470000 | 4,99172100 | 0,04083784 | 0,01712803 | 0,95172374 | 0,04276991 | 0,01878705 | 0,93891000 |
| MOMENTO | 5,06001000 | 5,01196000 | 0,04973310 | 0,02540229 | 0,92840230 | 0,05477121 | 0,03080964 | 0,89981700 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 5,04914000 | 5,00116000 | 0,04974632 | 0,02541581 | 0,92836421 | 0,05460270 | 0,03062035 | 0,90043200 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 5,14400000 | 5,00754000 | 0,05020014 | 0,02588163 | 0,92705124 | 0,05527547 | 0,03137955 | 0,89796300 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 5,08600910 | 5,03734000 | 0,04970869 | 0,02537737 | 0,92847254 | 0,05517345 | 0,03126383 | 0,89834000 |

Figura 12 – Distribuição de Weibull – Icapuí Fevereiro 2010

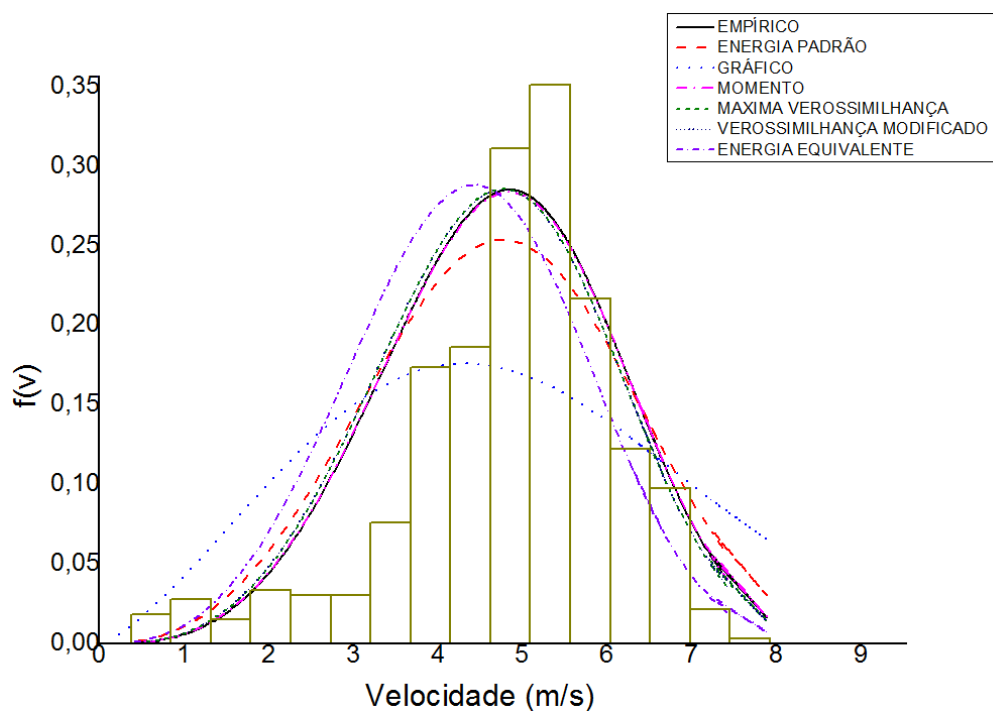


Tabela 5 – Análise Estatística – Icapuí Fevereiro 2010

| ICAPUÍ – FEVEREIRO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 3,91581000 | 5,22953000 | 0,04250338 | 0,01855363 | 0,92221022 | 0,05000530 | 0,02568110 | 0,86287100 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,47366000 | 5,26397000 | 0,03979693 | 0,01626601 | 0,93180152 | 0,04648920 | 0,02219660 | 0,88147700 |
| GRÁFICO | 2,35010000 | 5,45889700 | 0,03204213 | 0,01054447 | 0,95579023 | 0,03491760 | 0,01252190 | 0,93313700 |
| MOMENTO | 3,89576000 | 5,23105000 | 0,04238241 | 0,01844817 | 0,92265240 | 0,04985470 | 0,02552660 | 0,86369500 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 3,86897000 | 5,16186000 | 0,04264044 | 0,01867348 | 0,92170772 | 0,04917930 | 0,02483970 | 0,86736300 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 3,86210000 | 5,16111000 | 0,04260639 | 0,01864367 | 0,92183271 | 0,04911990 | 0,02477970 | 0,86768300 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 3,64121000 | 4,83654000 | 0,04356223 | 0,01948956 | 0,91828613 | 0,04532280 | 0,02109670 | 0,88735000 |

Figura 13 – Distribuição de Weibull – Icapuí Março 2010

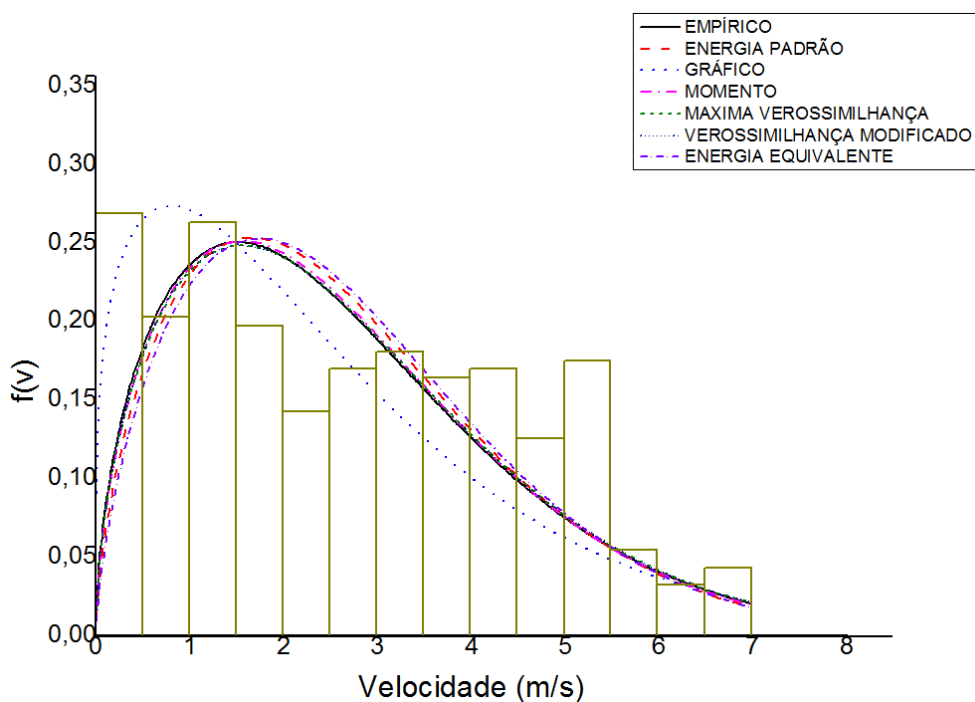


Tabela 6 – Análise Estatística – Icapuí Março 2010

| ICAPUÍ - MARÇO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,53765500 | 2,99475100 | 0,03553483 | 0,01325860 | 0,88232881 | 0,02348092 | 0,00578921 | 0,99759280 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,61564290 | 3,01140000 | 0,03622678 | 0,01377998 | 0,87770149 | 0,02356947 | 0,00583296 | 0,99757461 |
| GRÁFICO | 2,76870000 | 2,89864140 | 0,03615502 | 0,01372544 | 0,87818554 | 0,02231753 | 0,00522976 | 0,99782543 |
| MOMENTO | 2,55902490 | 2,99915100 | 0,03572103 | 0,01339792 | 0,88109236 | 0,02349626 | 0,00579678 | 0,99758966 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,55079430 | 3,02739000 | 0,03538095 | 0,01314402 | 0,88334573 | 0,02376046 | 0,00592788 | 0,99753515 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,54691730 | 3,02532000 | 0,03535838 | 0,01312726 | 0,88349447 | 0,02374497 | 0,00592015 | 0,99753836 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,65271000 | 3,04743000 | 0,03631912 | 0,01385032 | 0,87707723 | 0,02392266 | 0,00600908 | 0,99750138 |

Figura 14 – Distribuição de Weibull – Icapuí Abril 2010

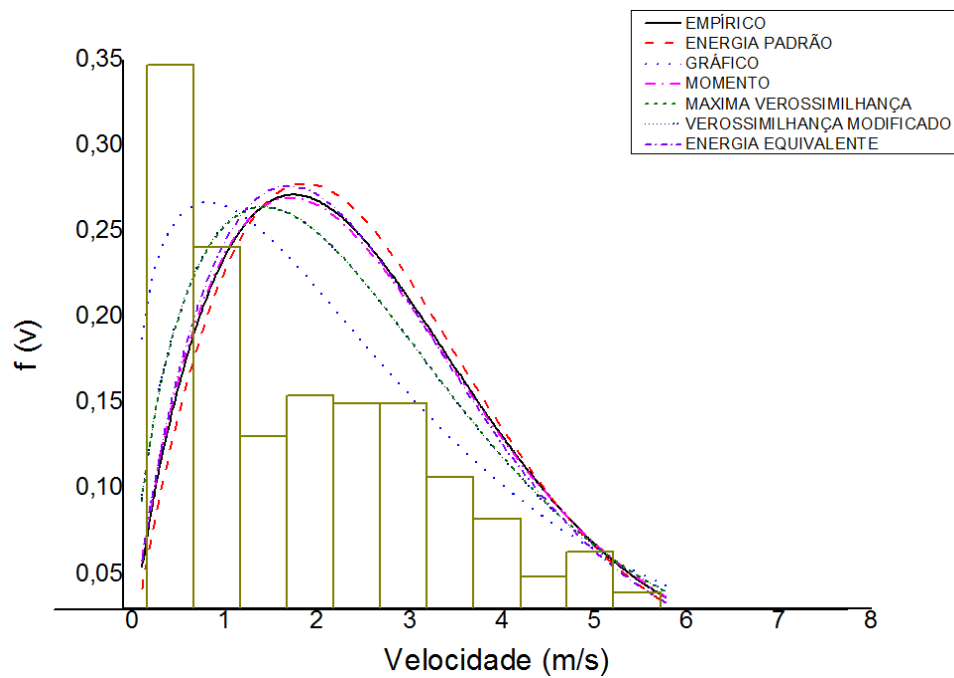


Tabela 7 – Análise Estatística – Icapuí Abril 2010

| ICAPUÍ - ABRIL 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,14800960 | 2,95893310 | 0,04221402 | 0,01900825 | 0,94988222 | 0,02990178 | 0,00953724 | 0,99685398 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,11070290 | 2,95874470 | 0,04158006 | 0,01844161 | 0,95137624 | 0,02987027 | 0,00951715 | 0,99686061 |
| GRÁFICO | 1,81550000 | 2,65260964 | 0,03794781 | 0,01536039 | 0,95950030 | 0,02567909 | 0,00703377 | 0,99767979 |
| MOMENTO | 2,12690000 | 2,95885000 | 0,04185598 | 0,01868718 | 0,95072877 | 0,02988300 | 0,00952527 | 0,99685793 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,18121000 | 2,97507000 | 0,04267119 | 0,01942219 | 0,94879082 | 0,03023980 | 0,00975409 | 0,99678245 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,17734000 | 2,97395000 | 0,04261350 | 0,01936971 | 0,94892918 | 0,03021361 | 0,00973720 | 0,99678802 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 1,94265000 | 2,88067000 | 0,03906604 | 0,01627899 | 0,95707827 | 0,02864053 | 0,00874965 | 0,99711378 |

Figura 15 – Distribuição de Weibull – Icapuí Maio 2010

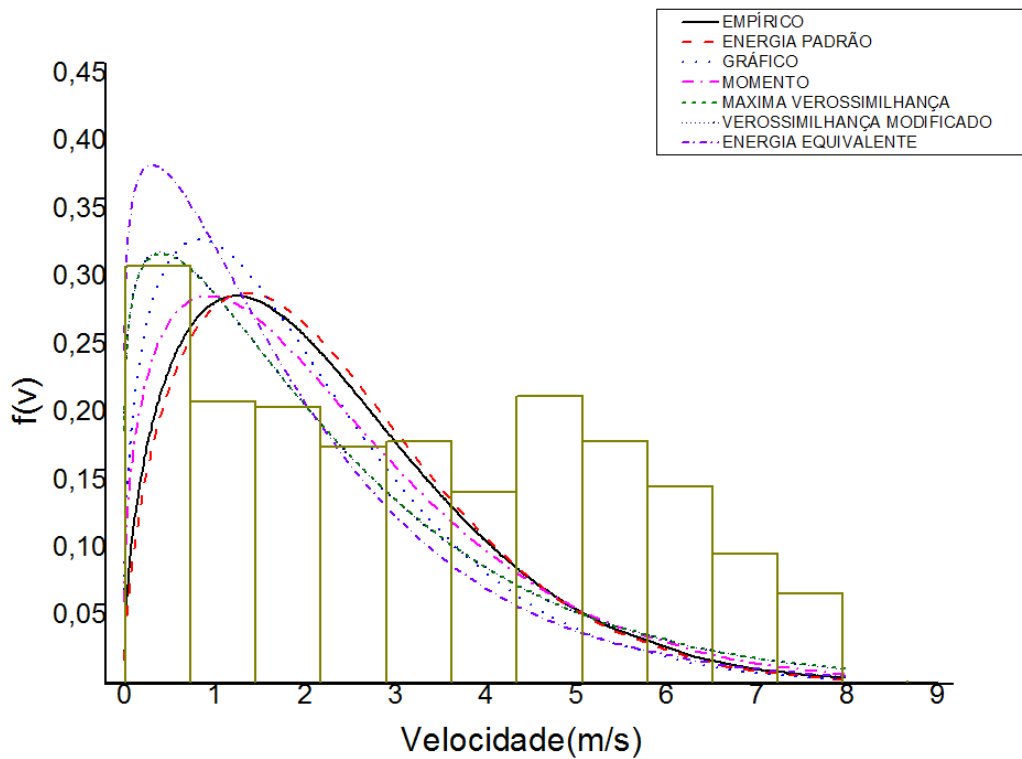


Tabela 8 – Análise Estatística – Icapuí Maio 2010

| ICAPUÍ - MAIO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,49766000 | 2,60034000 | 0,03461156 | 0,01257858 | 0,95963777 | 0,03565117 | 0,01334556 | 0,99743838 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,56196810 | 2,61261780 | 0,03520317 | 0,01301226 | 0,95824617 | 0,03499956 | 0,01286218 | 0,99753116 |
| GRÁFICO | 2,35300000 | 2,23625850 | 0,03749838 | 0,01476435 | 0,95262405 | 0,03753116 | 0,01479018 | 0,99716109 |
| MOMENTO | 2,34502000 | 2,55873910 | 0,03355034 | 0,01181907 | 0,96207490 | 0,03721423 | 0,01454144 | 0,99720884 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,14860570 | 2,43665000 | 0,03370724 | 0,01192987 | 0,96171934 | 0,03925440 | 0,01617954 | 0,99689441 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,14615040 | 2,43143253 | 0,03375937 | 0,01196680 | 0,96160085 | 0,03928089 | 0,01620138 | 0,99689022 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,63483000 | 2,43998000 | 0,03895039 | 0,01592990 | 0,94888404 | 0,03986196 | 0,99679754 | 0,94786240 |

Figura 16 – Distribuição de Weibull – Icapuí Junho 2010

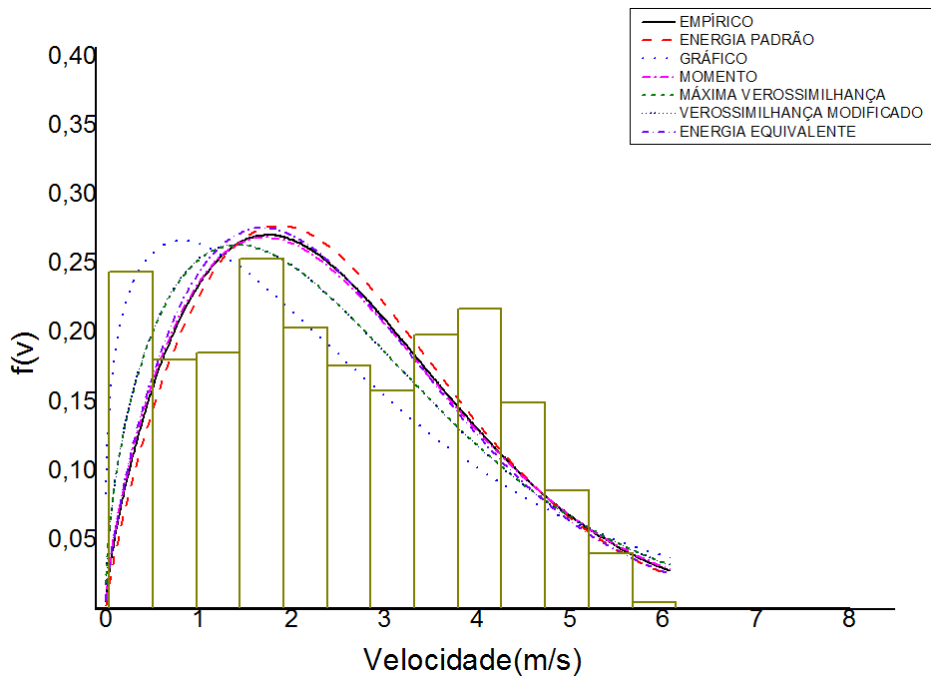


Tabela 9 – Análise Estatística – Icapuí Junho 2010

| ICAPUÍ – JUNHO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 1,71989350 | 2,89472680 | 0,02162975 | 0,01964953 | 0,92981455 | 0,01367261 | 0,00785150 | 0,99902146 |
| ENERGIA PADRÃO | 1,81205030 | 2,90310830 | 0,02211502 | 0,02054110 | 0,92662997 | 0,01407681 | 0,00832258 | 0,99896275 |
| GRÁFICO | 1,26870000 | 2,76604750 | 0,02035201 | 0,01739658 | 0,93786177 | 0,01177886 | 0,00582714 | 0,99927376 |
| MOMENTO | 1,69554000 | 2,89204870 | 0,02150727 | 0,01942763 | 0,93060713 | 0,01356710 | 0,00773078 | 0,99903650 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 1,53114530 | 2,83569000 | 0,02095048 | 0,01843475 | 0,93415360 | 0,01270506 | 0,00677958 | 0,99915505 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 1,52784540 | 2,82957860 | 0,02096898 | 0,01846732 | 0,93403726 | 0,01266305 | 0,00673482 | 0,99916063 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 1,70634000 | 2,82865000 | 0,02192890 | 0,02019682 | 0,92785971 | 0,01321255 | 0,00733200 | 0,99908620 |

Figura 17 – Distribuição de Weibull – Icapuí Julho 2010

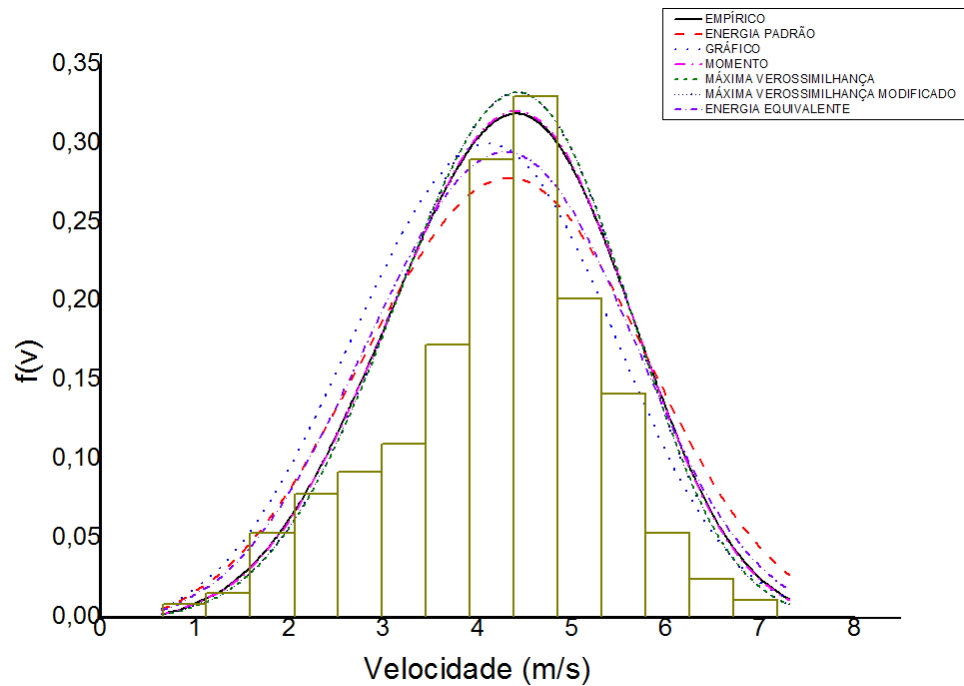


Tabela 10 – Análise Estatística – Icapuí Julho 2010

| ICAPUÍ – JULHO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 3,97683940 | 4,74839790 | 0,032491696 | 0,016384460 | 0,95268726 | 0,032633636 | 0,0141191210 | 0,990514360 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,45643100 | 4,78510370 | 0,031461111 | 0,013792492 | 0,96017198 | 0,032463466 | 0,014096769 | 0,990999950 |
| GRÁFICO | 3,52400000 | 4,51962002 | 0,032230738 | 0,015707050 | 0,95464339 | 0,031344296 | 0,013951279 | 0,994160640 |
| MOMENTO | 4,00064000 | 4,74679000 | 0,032539576 | 0,016510302 | 0,95232387 | 0,032142171 | 0,014054732 | 0,991913180 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 4,14621940 | 4,73703140 | 0,032833724 | 0,017293970 | 0,95006091 | 0,032585267 | 0,014112761 | 0,990652520 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 4,14034660 | 4,73032170 | 0,032838357 | 0,017306458 | 0,95002485 | 0,032525337 | 0,014104889 | 0,990823550 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 3,60990280 | 4,70042000 | 0,031921228 | 0,014922146 | 0,95690992 | 0,032142171 | 0,014054732 | 0,991913180 |

Figura 18 – Distribuição de Weibull – Icapuí Agosto 2010

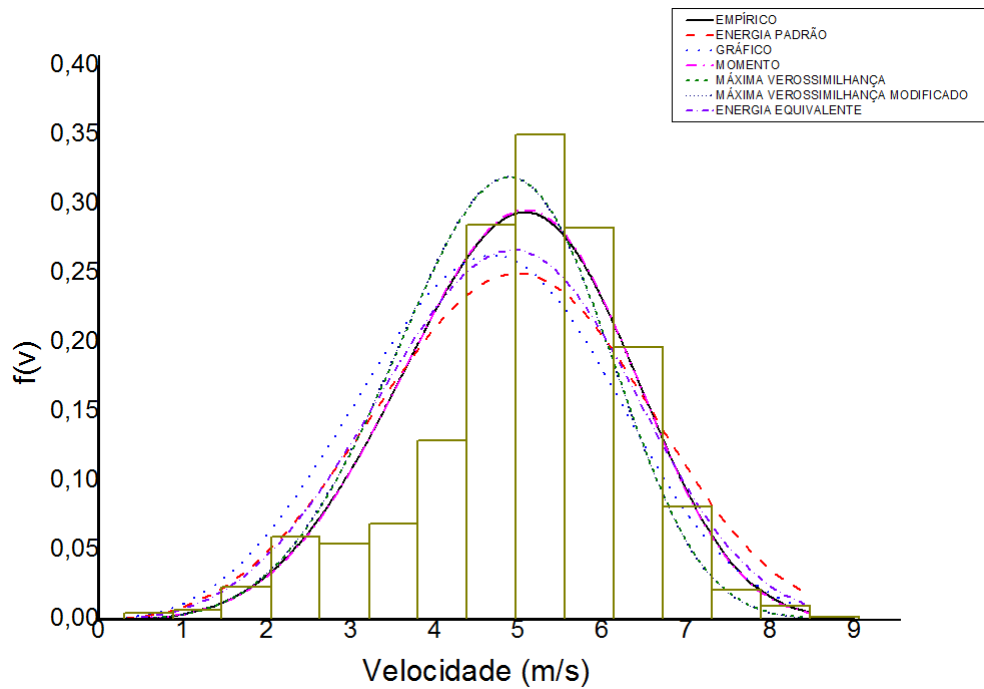


Tabela 11 – Análise Estatística – Icapuí Agosto 2010

| ICAPUÍ - AGOSTO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 4,20187310 | 5,42253230 | 0,03375542 | 0,01186905 | 0,97105107 | 0,03548059 | 0,01311326 | 0,97189532 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,55953930 | 5,47313430 | 0,03060309 | 0,00975572 | 0,97620553 | 0,03200906 | 0,01067271 | 0,97712596 |
| GRÁFICO | 3,52050000 | 5,14914000 | 0,03228681 | 0,01085873 | 0,97351525 | 0,02924567 | 0,00890947 | 0,98090499 |
| MOMENTO | 4,23097380 | 5,42037650 | 0,03390269 | 0,01197283 | 0,97079793 | 0,03563619 | 0,01322852 | 0,97164827 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 4,39212453 | 5,19713860 | 0,03611737 | 0,01358817 | 0,96685807 | 0,03479714 | 0,01261293 | 0,97296763 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 4,38545970 | 5,18925220 | 0,03614595 | 0,01360968 | 0,96680561 | 0,03470092 | 0,01254327 | 0,97311692 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 3,74015350 | 5,36325000 | 0,03194747 | 0,01063168 | 0,97406905 | 0,03219683 | 0,01079829 | 0,97685681 |

Figura 19 – Distribuição de Weibull – Icapuí Setembro 2010

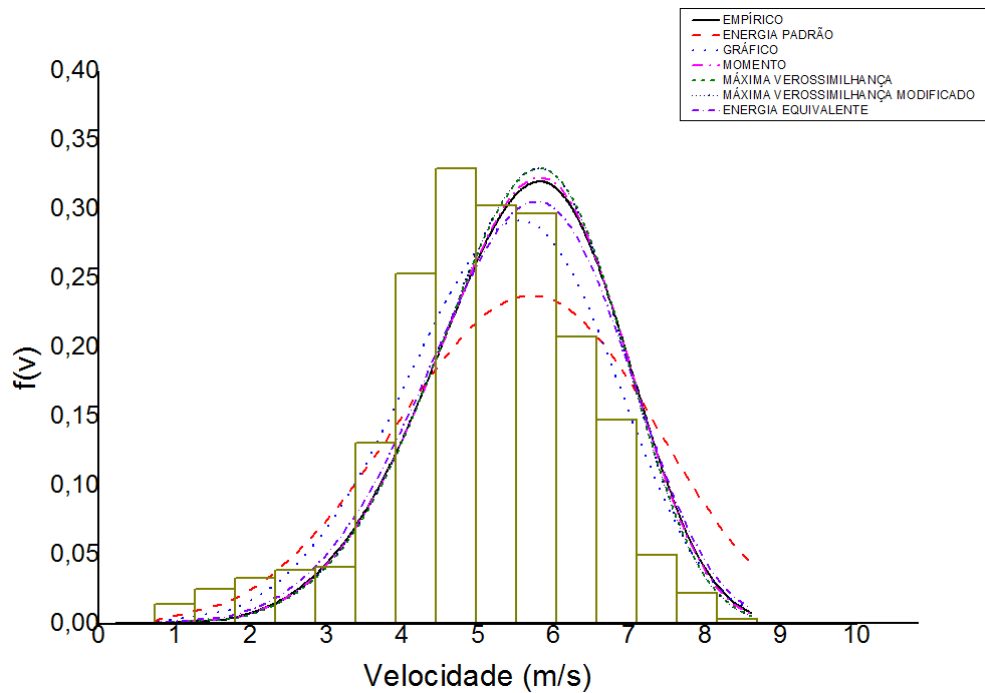


Tabela 12 – Análise Estatística – Icapuí Setembro 2010

| ICAPUÍ – SETEMBRO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 5,18153000 | 6,0665902 | 0,031018688 | 0,010871400 | 0,97892264 | 0,04602331 | 0,038008000 | 0,89517059 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,84772330 | 6,1715061 | 0,030836791 | 0,007335600 | 0,98577776 | 0,04597183 | 0,037361000 | 0,89695479 |
| GRÁFICO | 4,53330000 | 5,85863951 | 0,03096418 | 0,009739139 | 0,98111787 | 0,04601907 | 0,037954431 | 0,89531809 |
| MOMENTO | 5,22944020 | 6,06338000 | 0,03102574 | 0,011022383 | 0,97862994 | 0,04602436 | 0,038021088 | 0,89513424 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 5,32626210 | 6,04911000 | 0,03104108 | 0,011354615 | 0,97798581 | 0,04602648 | 0,038047970 | 0,89506010 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 5,31861000 | 6,04042000 | 0,03104116 | 0,011356390 | 0,97798237 | 0,04602668 | 0,038050445 | 0,89505327 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 4,92137540 | 6,04831000 | 0,03098533 | 0,010171144 | 0,98028031 | 0,04601835 | 0,037945342 | 0,89534315 |

Figura 20 – Distribuição de Weibull – Icapuí Outubro 2010

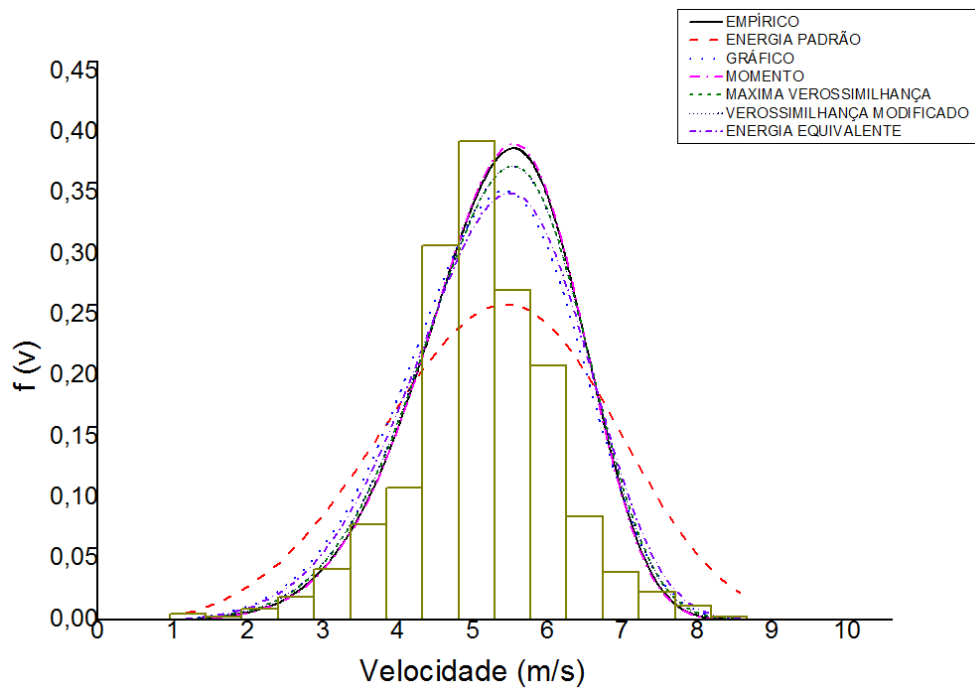


Tabela 13 – Análise Estatística – Icapuí Outubro 2010

| ICAPUÍ - OUTUBRO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 5,93879590 | 5,72551290 | 0,03553691 | 0,01323009 | 0,98197593 | 0,03942665 | 0,01628482 | 0,97617408 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,98929850 | 5,85772720 | 0,02796213 | 0,00819113 | 0,98884077 | 0,03390321 | 0,01204162 | 0,98238220 |
| GRÁFICO | 5,30870000 | 5,64591842 | 0,03325125 | 0,01158295 | 0,98421991 | 0,03839190 | 0,01544125 | 0,97740829 |
| MOMENTO | 5,99586370 | 5,72247710 | 0,03577948 | 0,01341132 | 0,98172903 | 0,04285660 | 0,01924149 | 0,97184826 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 5,71297699 | 5,73076000 | 0,03459975 | 0,01254150 | 0,98291403 | 0,04149482 | 0,01803812 | 0,97360888 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 5,70476870 | 5,72252610 | 0,03458601 | 0,01253153 | 0,98292761 | 0,04134862 | 0,01791123 | 0,97379452 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 5,34834000 | 5,71667390 | 0,03317169 | 0,01152759 | 0,98429533 | 0,03942665 | 0,01628482 | 0,97617408 |

Figura 21 – Distribuição de Weibull – Icapuí Novembro 2010

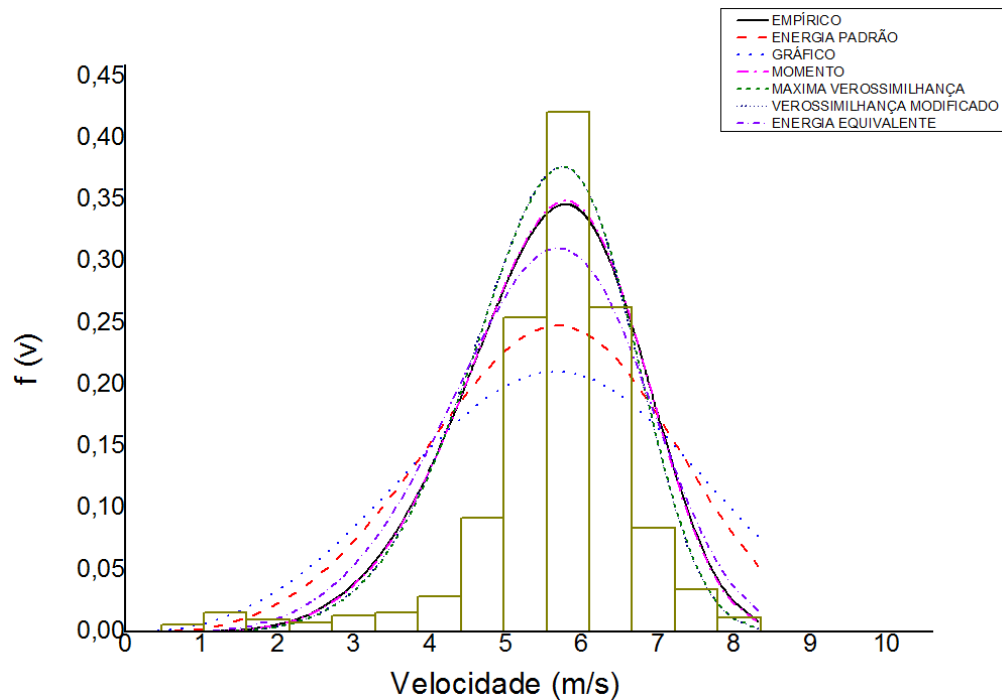


Tabela 14 – Análise Estatística – Icapuí Novembro 2010

| ICAPUÍ - NOVEMBRO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 5,55254390 | 5,99494790 | 0,03339844 | 0,01168573 | 0,98734969 | 0,04579073 | 0,02196639 | 0,96156950 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,98418120 | 6,11072590 | 0,02873657 | 0,00865114 | 0,99063477 | 0,03829632 | 0,01536447 | 0,97311965 |
| GRÁFICO | 3,42230000 | 6,25646481 | 0,02687494 | 0,00756656 | 0,99180887 | 0,03535573 | 0,01309553 | 0,97708919 |
| MOMENTO | 5,60554850 | 5,99172610 | 0,03356993 | 0,01180604 | 0,98721945 | 0,04602702 | 0,02219367 | 0,96117187 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 5,98609360 | 5,92529000 | 0,03499763 | 0,01283159 | 0,98610924 | 0,04723086 | 0,02336981 | 0,95911419 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 5,97696850 | 5,91626000 | 0,03500862 | 0,01283966 | 0,98610051 | 0,04708958 | 0,02323020 | 0,95935843 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 4,92910000 | 5,95415570 | 0,03172345 | 0,01054300 | 0,98858674 | 0,04215505 | 0,01861670 | 0,96742983 |

Figura 22 – Distribuição de Weibull – Icapuí Dezembro 2010

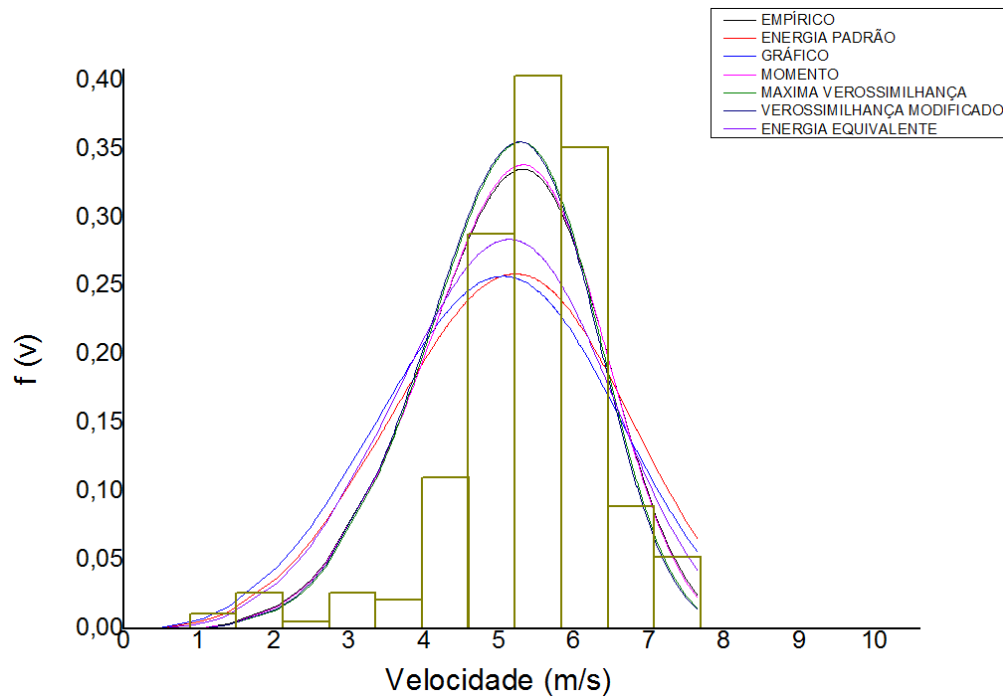


Tabela 15 – Análise Estatística – Icapuí Dezembro 2010

| ICAPUÍ - DEZEMBRO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 4,96877450 | 5,56317150 | 0,03327916 | 0,01169031 | 0,98377884 | 0,04689868 | 0,02321680 | 0,94764125 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,83371130 | 5,64686300 | 0,02881025 | 0,00876143 | 0,98784287 | 0,03991215 | 0,01681479 | 0,96207914 |
| GRÁFICO | 3,70220000 | 5,50636445 | 0,02915658 | 0,00897334 | 0,98754883 | 0,03784402 | 0,01511735 | 0,94708099 |
| MOMENTO | 5,01324410 | 5,56030620 | 0,03346542 | 0,01182153 | 0,98359676 | 0,04714893 | 0,02346523 | 0,94708099 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 5,22427500 | 5,51195760 | 0,03454565 | 0,01259702 | 0,98252071 | 0,04793491 | 0,02425409 | 0,94530195 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 5,20448610 | 5,49107900 | 0,03458888 | 0,01262856 | 0,98247694 | 0,04758623 | 0,02390252 | 0,94609481 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 4,11634270 | 5,49733440 | 0,03053539 | 0,00984211 | 0,98634335 | 0,04066832 | 0,01745796 | 0,96062863 |

6.2 Curvas e Tabelas mensais – Camocim 2005

Nesta seção são expostos os gráficos mensais para a cidade de Camocim no período de Janeiro-Dezembro de 2005, adicionando também as tabelas de Análise Estatística.

Figura 23 – Distribuição de Weibull – Camocim Janeiro 2005

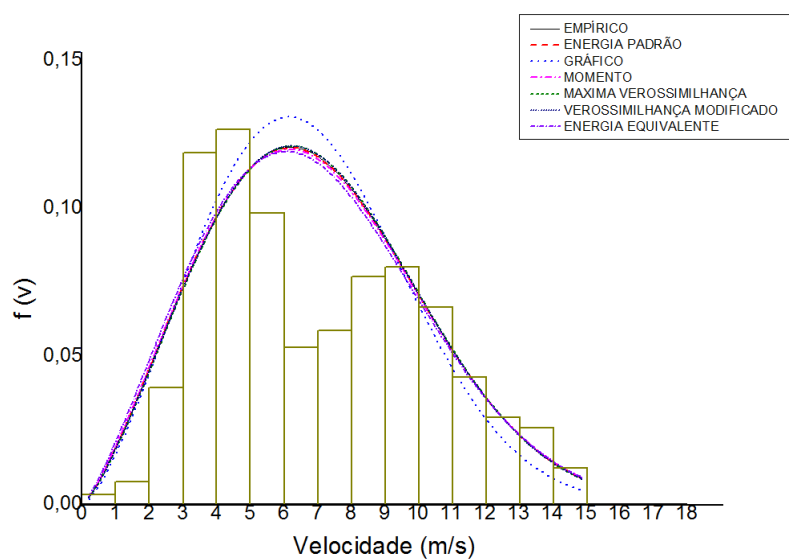


Tabela 16 – Análise Estatística – Camocim Janeiro 2005

| CAMOCIM - JANEIRO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,32469430 | 7,90433320 | 0,03478571 | 0,00126505 | 0,94175223 | 0,06558204 | 0,00449650 | 0,97038369 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,32188560 | 7,90445920 | 0,03474085 | 0,00126179 | 0,94190235 | 0,06556772 | 0,00449454 | 0,97039663 |
| GRÁFICO | 2,46220000 | 7,61759394 | 0,03829254 | 0,00153297 | 0,92941606 | 0,06408719 | 0,00429386 | 0,97171843 |
| MOMENTO | 2,30685850 | 7,90556000 | 0,03450106 | 0,00124443 | 0,94270161 | 0,06549555 | 0,00448465 | 0,97046176 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,34230118 | 7,92562660 | 0,03498794 | 0,00127980 | 0,94107299 | 0,06584361 | 0,00453244 | 0,97014698 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,33915290 | 7,91497730 | 0,03497647 | 0,00127896 | 0,94111163 | 0,06574383 | 0,00451872 | 0,97023739 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,26931750 | 7,85905340 | 0,03410267 | 0,00121586 | 0,94401722 | 0,06495601 | 0,00441107 | 0,97094642 |

Figura 24 – Distribuição de Weibull – Camocim Fevereiro 2005

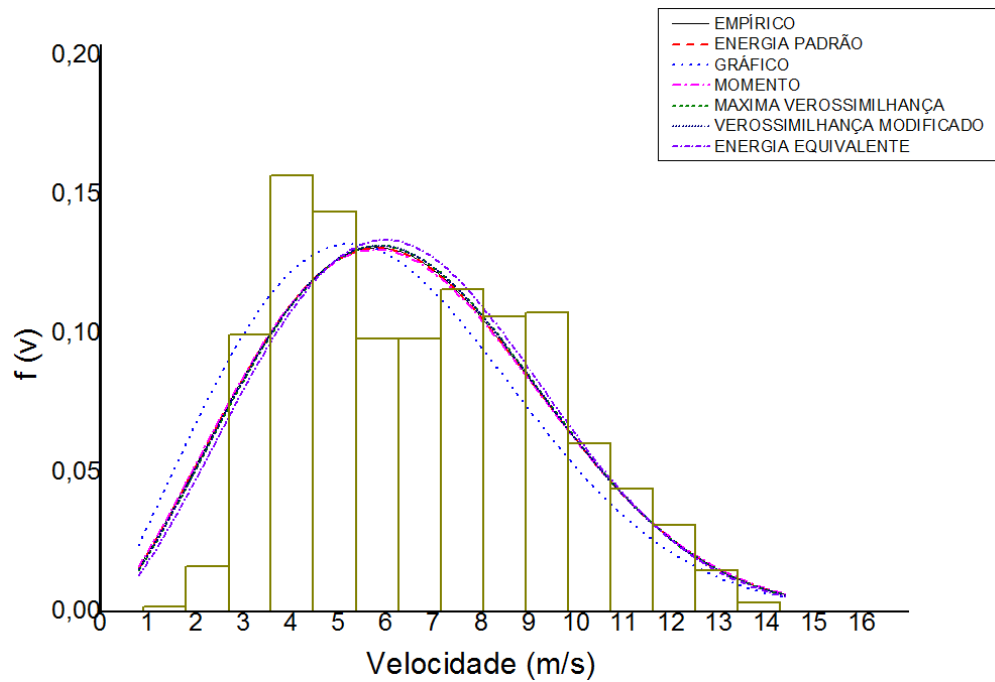


Tabela 17 – Análise Estatística – Camocim Fevereiro 2005

| CAMOCIM - FEVEREIRO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,35586920 | 7,35431730 | 0,03612528 | 0,00137029 | 0,91869594 | 0,06757053 | 0,00479407 | 0,97173011 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,35421510 | 7,35439720 | 0,03609549 | 0,00136803 | 0,91882995 | 0,06756801 | 0,00479371 | 0,97173223 |
| GRÁFICO | 2,19720000 | 6,91150693 | 0,03632084 | 0,00138516 | 0,91781328 | 0,06379070 | 0,00427272 | 0,97480443 |
| MOMENTO | 2,33850680 | 7,35512870 | 0,03581431 | 0,00134680 | 0,92008963 | 0,06754531 | 0,00479049 | 0,97175122 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,37903370 | 7,37503140 | 0,03643050 | 0,00139354 | 0,91731624 | 0,06780663 | 0,00482763 | 0,97153221 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,37549350 | 7,36405670 | 0,03642434 | 0,00139307 | 0,91734423 | 0,06769934 | 0,00481236 | 0,97162223 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,44738680 | 7,42227020 | 0,03744123 | 0,00147194 | 0,91266463 | 0,06843127 | 0,00491698 | 0,97100530 |

Figura 25 – Distribuição de Weibull – Camocim Março 2005

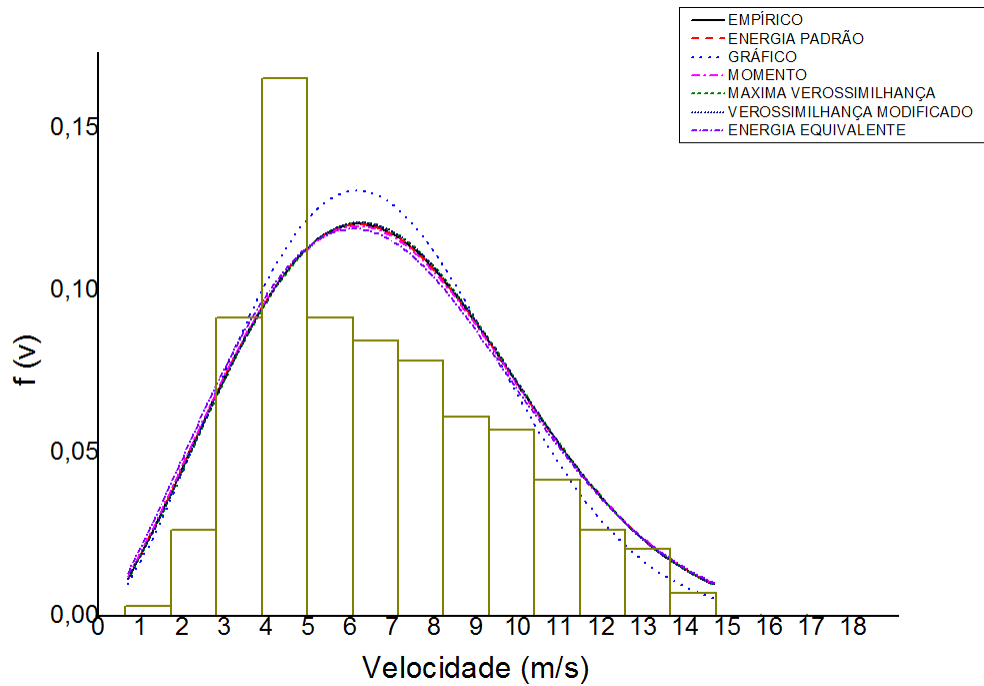


Tabela 18 – Análise Estatística – Camocim Março 2005

| CAMOCIM - MARÇO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,19403010 | 6,22295470 | 0,01849846 | 0,00357747 | 0,98168251 | 0,02358777 | 0,00581673 | 0,99434648 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,16779700 | 6,22305760 | 0,01833500 | 0,00351453 | 0,98200480 | 0,02337124 | 0,00571043 | 0,99444980 |
| GRÁFICO | 2,48500000 | 5,52996279 | 0,02220571 | 0,00515507 | 0,97360485 | 0,02216184 | 0,00513472 | 0,99500935 |
| MOMENTO | 2,17367310 | 6,22305040 | 0,01837134 | 0,00352847 | 0,98193339 | 0,02341983 | 0,00573420 | 0,99442669 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,21021585 | 6,24604910 | 0,01854819 | 0,00359673 | 0,98158389 | 0,02381512 | 0,00592940 | 0,99423697 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,20724510 | 6,23765390 | 0,01854829 | 0,00359677 | 0,98158368 | 0,02375657 | 0,00590028 | 0,99426527 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,11287150 | 6,18348510 | 0,01809695 | 0,00342386 | 0,98246903 | 0,02276305 | 0,00541709 | 0,99473491 |

Figura 26 – Distribuição de Weibull – Camocim Abril 2005

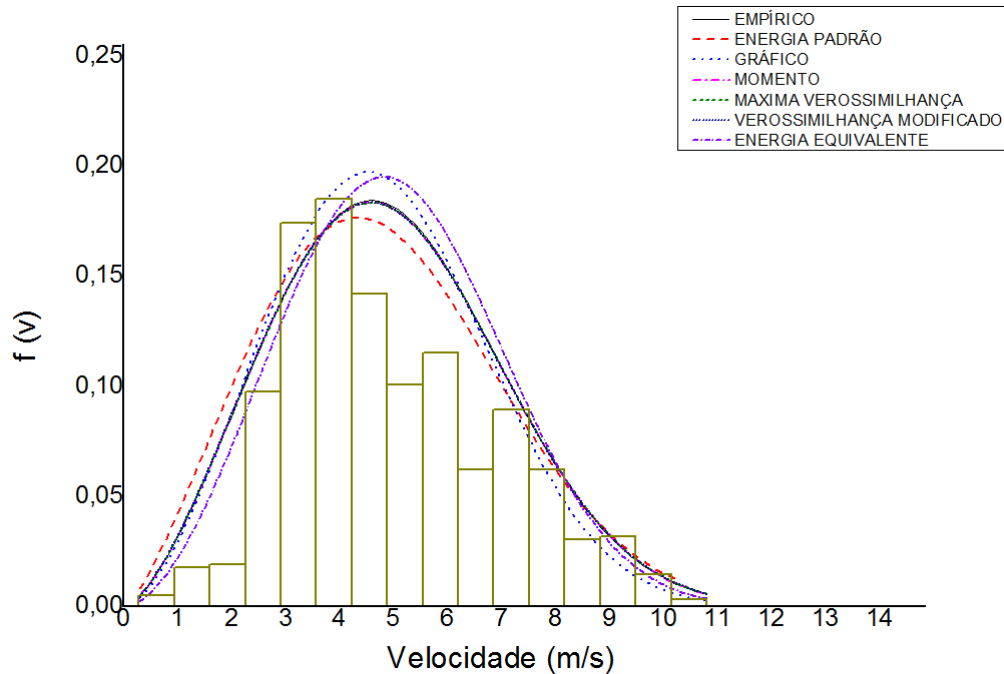


Tabela 19 – Análise Estatística – Camocim Abril 2005

| CAMOCIM - ABRIL 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,55787980 | 5,57248440 | 0,01986874 | 0,00413565 | 0,98493745 | 0,02143472 | 0,00481326 | 0,99703537 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,36522820 | 5,46931270 | 0,01903053 | 0,00379407 | 0,98618154 | 0,02013931 | 0,00424906 | 0,99738288 |
| GRÁFICO | 2,67300000 | 5,39789051 | 0,02103431 | 0,00463511 | 0,98311837 | 0,02065700 | 0,00447031 | 0,99724660 |
| MOMENTO | 2,54496080 | 5,57325510 | 0,01978860 | 0,00410236 | 0,98505872 | 0,02139244 | 0,00479429 | 0,99704706 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,54603480 | 5,58130090 | 0,01977606 | 0,00409716 | 0,98507765 | 0,02144988 | 0,00482007 | 0,99703118 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,54249870 | 5,57354910 | 0,01977303 | 0,00409591 | 0,98508222 | 0,02138543 | 0,00479114 | 0,99704899 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,79022760 | 5,65720220 | 0,02116447 | 0,00469265 | 0,98290879 | 0,02296998 | 0,00552745 | 0,99659548 |

Figura 27 – Distribuição de Weibull – Camocim Maio 2005

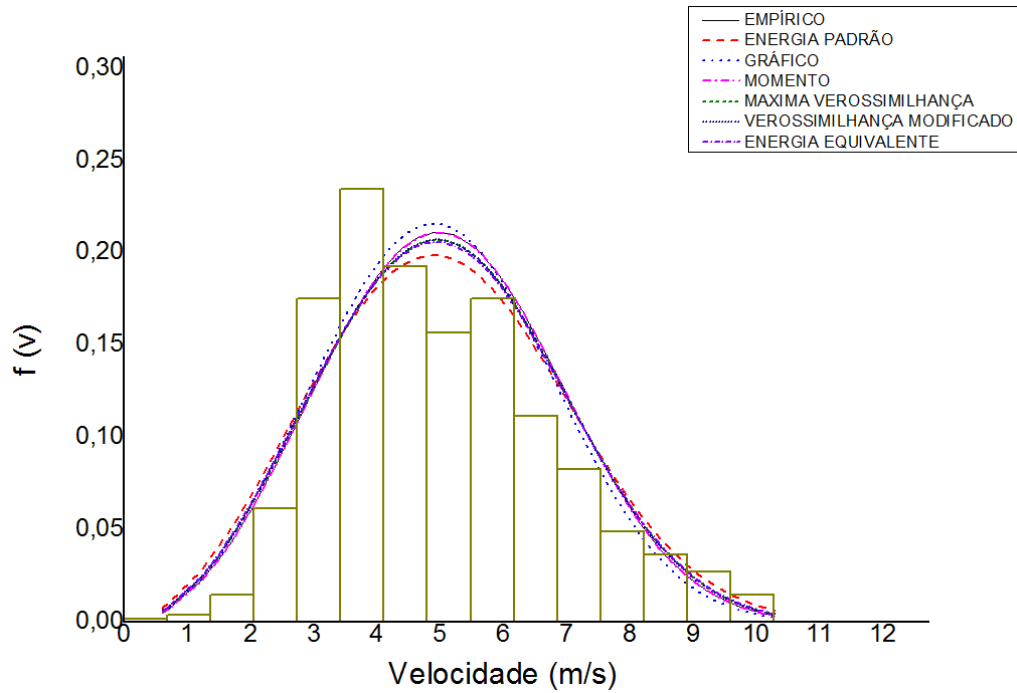


Tabela 20 – Análise Estatística – Camocim Maio 2005

| CAMOCIM - MAIO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 3,06552060 | 5,66688970 | 0,02216732 | 0,00514790 | 0,98325056 | 0,01988688 | 0,00414321 | 0,99614281 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,86648990 | 5,68327410 | 0,02101698 | 0,00462747 | 0,98494383 | 0,01905093 | 0,00380221 | 0,99646027 |
| GRÁFICO | 3,08100000 | 5,56766084 | 0,02249287 | 0,00530021 | 0,98275497 | 0,01903580 | 0,00379617 | 0,99646589 |
| MOMENTO | 3,06556300 | 5,66688620 | 0,02216757 | 0,00514801 | 0,98325018 | 0,01988707 | 0,00414329 | 0,99614274 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 3,00318280 | 5,67558650 | 0,02179177 | 0,00497495 | 0,98381328 | 0,01965080 | 0,00404542 | 0,99623385 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,99912990 | 5,66792710 | 0,02178567 | 0,00497216 | 0,98382233 | 0,01956022 | 0,00400822 | 0,99626849 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,97893170 | 5,66897770 | 0,02166939 | 0,00491923 | 0,98399457 | 0,01946910 | 0,00397096 | 0,99630317 |

Figura 28 – Distribuição de Weibull – Camocim Junho 2005

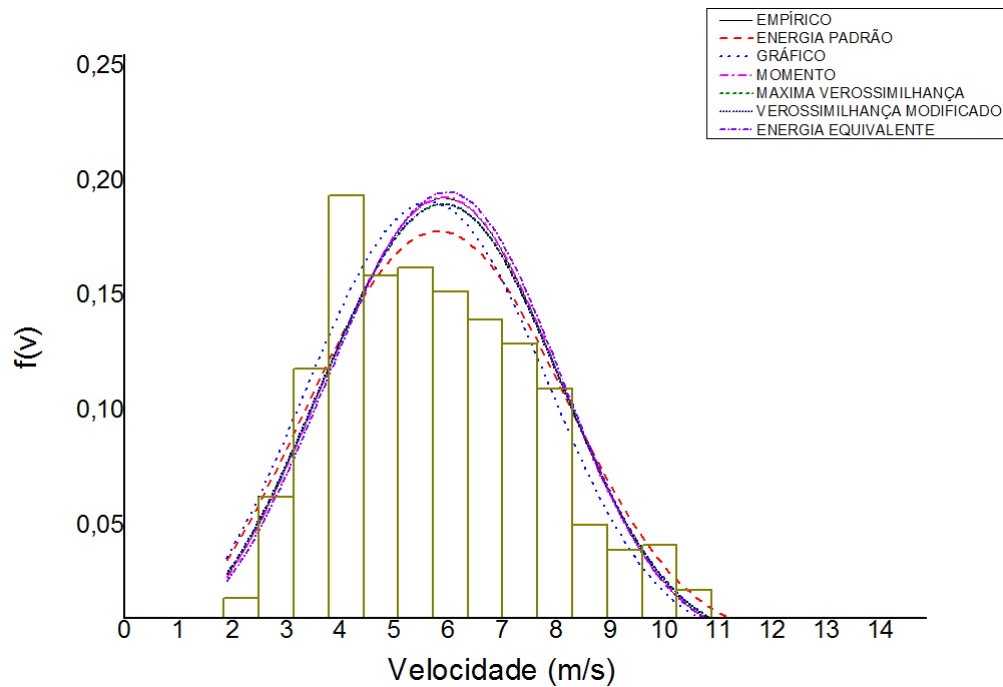


Tabela 21 – Análise Estatística – Camocim Junho 2005

| CAMOCIM - JUNHO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 3,28943210 | 6,60727060 | 0,02000250 | 0,00422328 | 0,97947070 | 0,01927215 | 0,00392050 | 0,99587102 |
| ENERGIA PADRÃO | 3,02497840 | 6,63362610 | 0,01846313 | 0,00359825 | 0,98250893 | 0,01828445 | 0,00352895 | 0,99628340 |
| GRÁFICO | 3,12760000 | 6,37945223 | 0,01963686 | 0,00407029 | 0,98021438 | 0,01676222 | 0,00296581 | 0,99687647 |
| MOMENTO | 3,29548320 | 6,60666220 | 0,02003860 | 0,00423854 | 0,97939653 | 0,01929599 | 0,00393020 | 0,99586080 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 3,24551380 | 6,61975570 | 0,01972559 | 0,00410716 | 0,98003516 | 0,01916308 | 0,00387625 | 0,99591763 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 3,24099990 | 6,61054880 | 0,01971798 | 0,00410399 | 0,98005058 | 0,01907095 | 0,00383907 | 0,99595678 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 3,35531060 | 6,63945190 | 0,02032120 | 0,00435893 | 0,97881130 | 0,01983603 | 0,00415327 | 0,99562587 |

Figura 29 – Distribuição de Weibull – Camocim Julho 2005

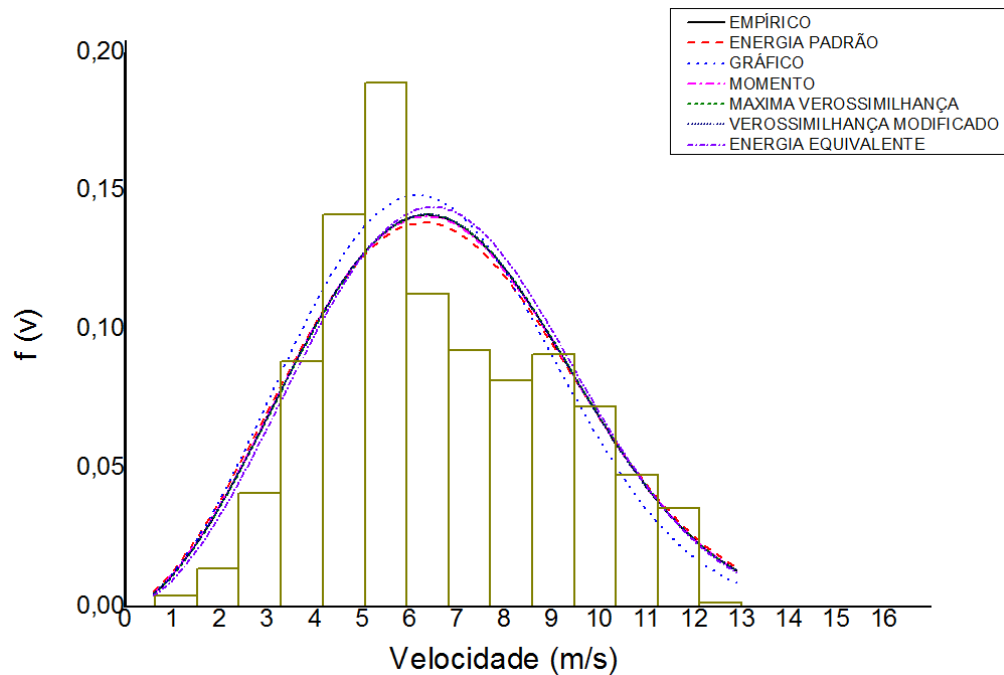


Tabela 22 – Análise Estatística – Camocim Julho 2005

| CAMOCIM - JULHO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,68767290 | 7,56752710 | 0,01328352 | 0,00184854 | 0,99007925 | 0,01812823 | 0,00344282 | 0,99619928 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,62600190 | 7,57320450 | 0,01297124 | 0,00176265 | 0,99054022 | 0,01789049 | 0,00335311 | 0,99629831 |
| GRÁFICO | 2,73010000 | 7,29439831 | 0,01395294 | 0,00203955 | 0,98905415 | 0,01709724 | 0,00306235 | 0,99661930 |
| MOMENTO | 2,67789100 | 7,56844980 | 0,01323330 | 0,00183459 | 0,99015413 | 0,01809025 | 0,00342841 | 0,99621519 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,69572080 | 7,57955750 | 0,01330659 | 0,00185497 | 0,99004476 | 0,01821445 | 0,00347565 | 0,99616304 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,69209750 | 7,56936990 | 0,01330304 | 0,00185398 | 0,99005007 | 0,01815515 | 0,00345305 | 0,99618798 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,77593340 | 7,62087430 | 0,01366143 | 0,00195522 | 0,98950674 | 0,01874582 | 0,00368140 | 0,99593590 |

Figura 30 – Distribuição de Weibull – Camocim Agosto 2005

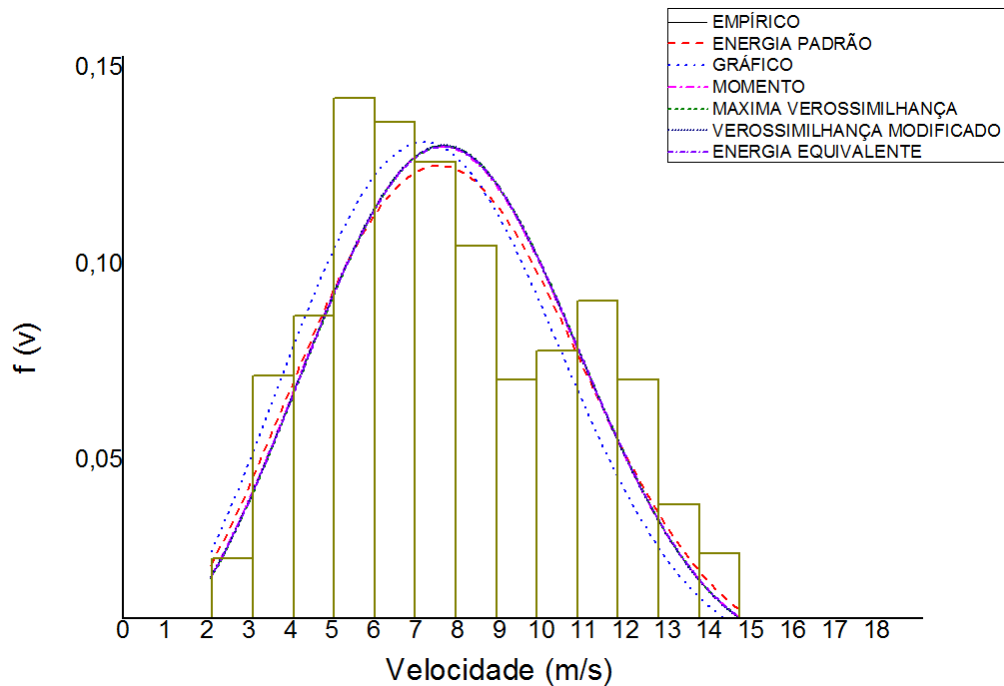


Tabela 23 – Análise Estatística – Camocim Agosto 2005

| CAMOCIM - AGOSTO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,91841640 | 8,81476620 | 0,01115566 | 0,00130999 | 0,99099660 | 0,01659192 | 0,00289781 | 0,99660880 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,79416900 | 8,83004310 | 0,01051365 | 0,00116355 | 0,99200306 | 0,01629190 | 0,00279396 | 0,99673033 |
| GRÁFICO | 2,78910000 | 8,41612502 | 0,01101263 | 0,00127661 | 0,99122598 | 0,01473852 | 0,00228657 | 0,99732411 |
| MOMENTO | 2,91455320 | 8,81525320 | 0,01113526 | 0,00130520 | 0,99102950 | 0,01658218 | 0,00289441 | 0,99661278 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,93130040 | 8,83524790 | 0,01120360 | 0,00132127 | 0,99091905 | 0,01670808 | 0,00293853 | 0,99656115 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,92736050 | 8,82337260 | 0,01119397 | 0,00131900 | 0,99093465 | 0,01665132 | 0,00291859 | 0,99658447 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,92375700 | 8,83293020 | 0,01116657 | 0,00131255 | 0,99097897 | 0,01667644 | 0,00292741 | 0,99657416 |

Figura 31 – Distribuição de Weibull – Camocim Setembro 2005

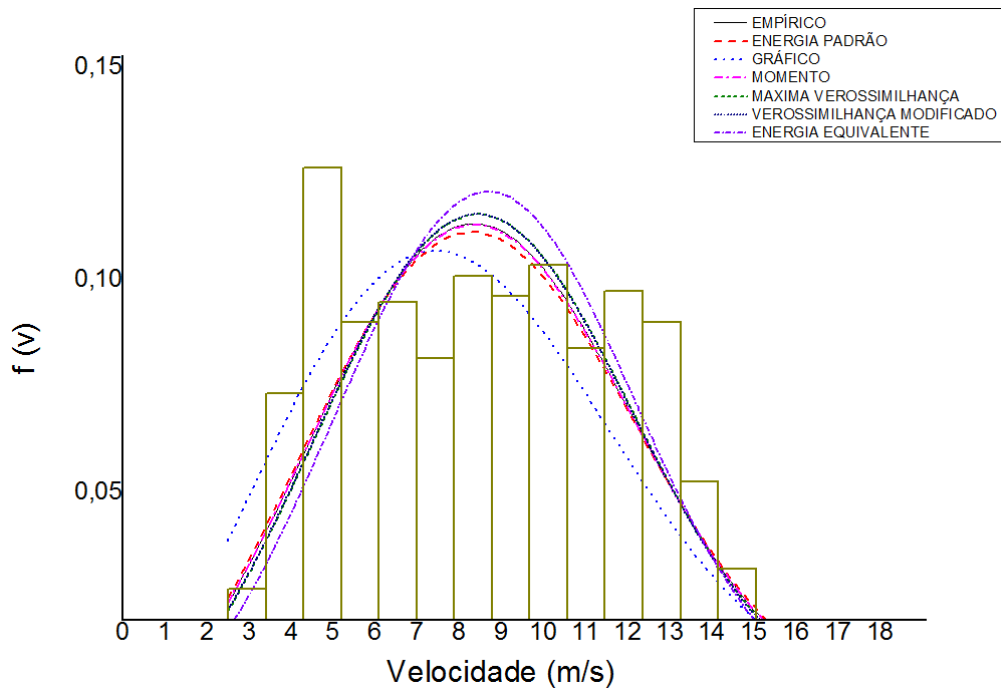


Tabela 24 – Análise Estatística – Camocim Setembro 2005

| CAMOCIM - SETEMBRO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,79846290 | 9,77692400 | 0,01101822 | 0,00128146 | 0,98461906 | 0,01716260 | 0,00310919 | 0,99563243 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,74407660 | 9,78400830 | 0,01073154 | 0,00121564 | 0,98540904 | 0,01700426 | 0,00305209 | 0,99571264 |
| GRÁFICO | 2,43380000 | 9,24928246 | 0,01016257 | 0,00109016 | 0,98691520 | 0,01498762 | 0,00237108 | 0,99666927 |
| MOMENTO | 2,79148010 | 9,77784680 | 0,01098121 | 0,00127286 | 0,98472221 | 0,01714207 | 0,00310176 | 0,99564287 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,87180700 | 9,80173770 | 0,01135378 | 0,00136070 | 0,98366793 | 0,01746391 | 0,00321932 | 0,99547772 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,86781840 | 9,78812420 | 0,01135520 | 0,00136104 | 0,98366385 | 0,01741829 | 0,00320252 | 0,99550132 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 3,05800460 | 9,88987350 | 0,01217639 | 0,00156501 | 0,98121560 | 0,01832690 | 0,00354535 | 0,99501974 |

Figura 32 – Distribuição de Weibull – Camocim Outubro 2005

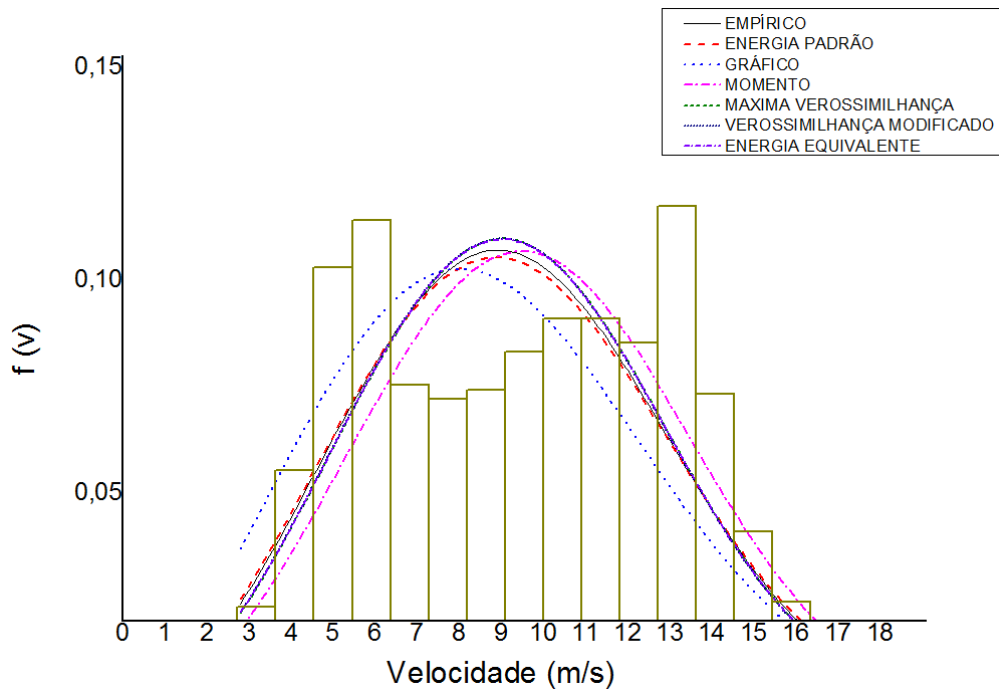


Tabela 25 – Análise Estatística – Camocim Outubro 2005

| CAMOCIM - OUTUBRO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,82273760 | 10,41329000 | 0,01011744 | 0,00108049 | 0,98618288 | 0,01749569 | 0,00323105 | 0,99564193 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,77273770 | 10,42033900 | 0,00986585 | 0,00102742 | 0,98686151 | 0,01737458 | 0,00318647 | 0,99570206 |
| GRÁFICO | 2,50040000 | 9,82838233 | 0,00961369 | 0,00097558 | 0,98752454 | 0,01575623 | 0,00262051 | 0,99646543 |
| MOMENTO | 2,96931260 | 10,89583900 | 0,01013582 | 0,00108442 | 0,98613262 | 0,01879418 | 0,00372845 | 0,99497103 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,91455280 | 10,43869200 | 0,01052359 | 0,00116898 | 0,98505127 | 0,01779714 | 0,00334335 | 0,99549046 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,91063540 | 10,42466100 | 0,01052734 | 0,00116982 | 0,98504062 | 0,01776055 | 0,00332961 | 0,99550899 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,90984860 | 10,43411400 | 0,01050800 | 0,00116552 | 0,98509551 | 0,01777543 | 0,00333520 | 0,99550146 |

Figura 33 – Distribuição de Weibull – Camocim Novembro 2005

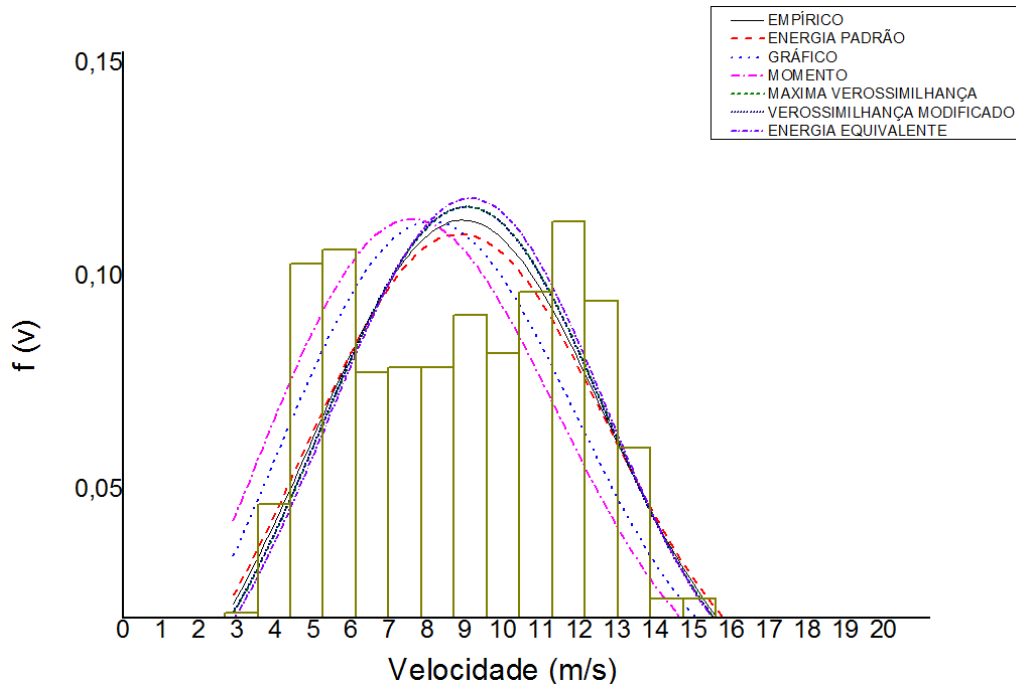


Tabela 26 – Análise Estatística – Camocim Novembro 2005

| CAMOCIM - NOVEMBRO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,96571400 | 10,26745000 | 0,01058743 | 0,00118321 | 0,99121391 | 0,01816048 | 0,00348125 | 0,99599376 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,87346100 | 10,28100900 | 0,01016722 | 0,00109115 | 0,99189750 | 0,01798583 | 0,00341462 | 0,99607045 |
| GRÁFICO | 2,72580000 | 9,58517068 | 0,01081956 | 0,00123566 | 0,99082441 | 0,01644821 | 0,00285574 | 0,99671361 |
| MOMENTO | 2,59557090 | 9,16402990 | 0,01119968 | 0,00132401 | 0,99016837 | 0,01559426 | 0,00256691 | 0,99704599 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 3,06745760 | 10,29021300 | 0,01100214 | 0,00127772 | 0,99051212 | 0,01844266 | 0,00359028 | 0,99586829 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 3,06319720 | 10,27592100 | 0,01100717 | 0,00127889 | 0,99050345 | 0,01840471 | 0,00357552 | 0,99588528 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 3,13954560 | 10,32232200 | 0,01127317 | 0,00134144 | 0,99003892 | 0,01868346 | 0,00368465 | 0,99575970 |

Figura 34 – Distribuição de Weibull – Camocim Dezembro 2005

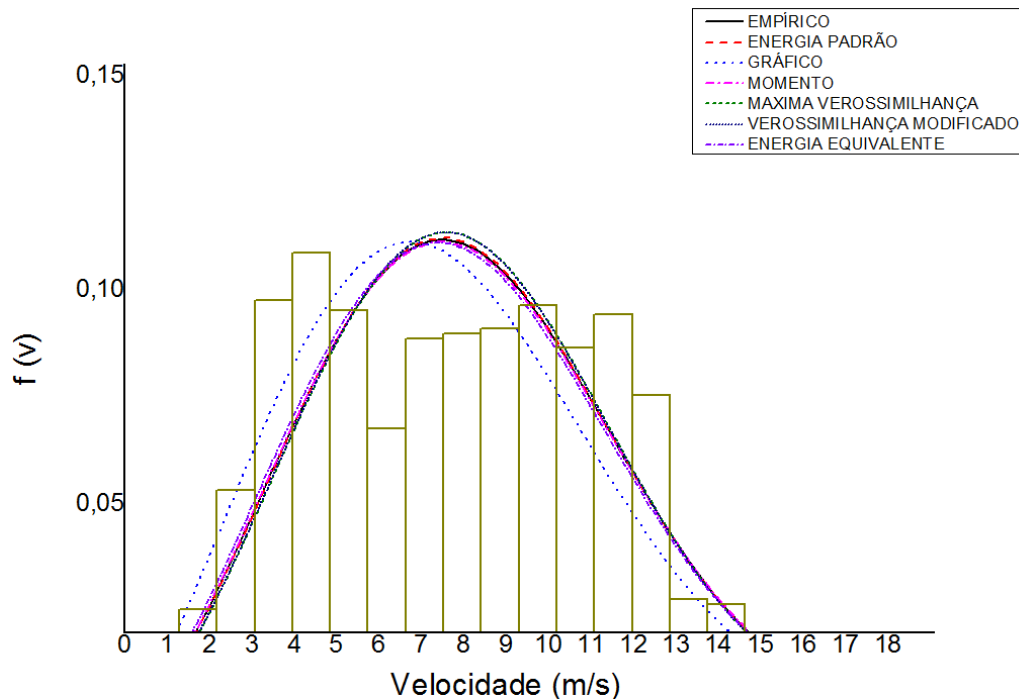


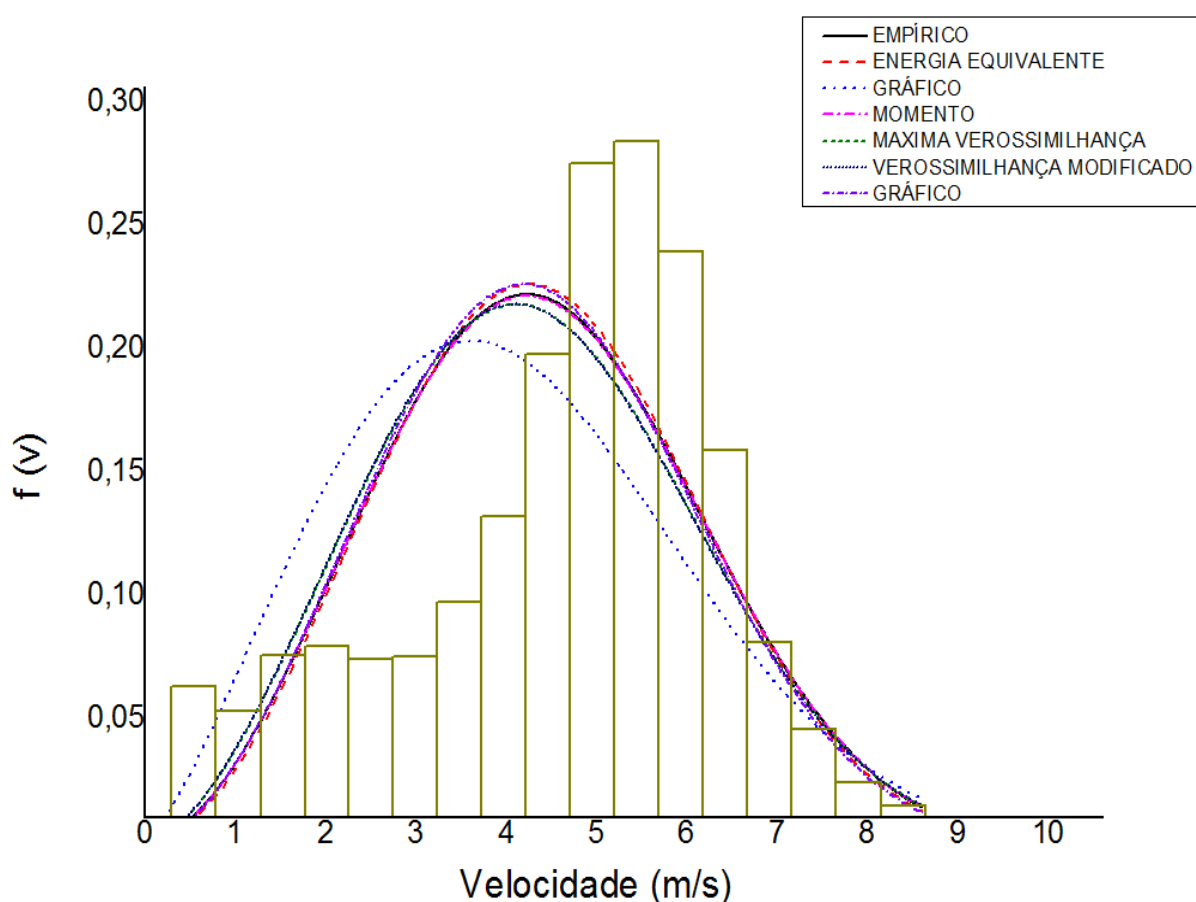
Tabela 27 – Análise Estatística – Camocim Dezembro 2005

| CAMOCIM - DEZEMBRO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,53633830 | 9,13506360 | 0,01018146 | 0,00108845 | 0,98934120 | 0,01803864 | 0,00341662 | 0,99648489 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,54901840 | 9,13384020 | 0,01024719 | 0,00110255 | 0,98920313 | 0,01806811 | 0,00342780 | 0,99647339 |
| GRÁFICO | 2,32710000 | 8,58019297 | 0,01025921 | 0,00110514 | 0,98917778 | 0,01648087 | 0,00285200 | 0,99706579 |
| MOMENTO | 2,52291720 | 9,13633210 | 0,01011229 | 0,00107371 | 0,98948554 | 0,01800776 | 0,00340493 | 0,99649691 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,59197730 | 9,15568410 | 0,01042683 | 0,00114155 | 0,98882126 | 0,01822531 | 0,00348770 | 0,99641176 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,58849350 | 9,14337810 | 0,01043046 | 0,00114234 | 0,98881348 | 0,01819013 | 0,00347425 | 0,99642560 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,49550520 | 9,06875490 | 0,01009479 | 0,00107000 | 0,98952190 | 0,01780098 | 0,00332719 | 0,99657690 |

6.3 Curvas e Tabelas anuais – Icapuí e Camocim

Os gráficos e tabelas de análise estatística são reproduzidos na base anual para as cidades de Icapuí e Camocim nos anos de 2010 e 2005. Tabelas de análise comparativa demonstram um panorama sobre a efetiva ordem de classificação obtida entre os métodos.

Figura 35 – Distribuição de Weibull – Icapuí 2010



No gráfico representado (FIGURA 35) é possível constatar que a curva gerada pelo método da energia equivalente possui geometria menos acentuada em relação às demais, fato proveniente da menor amplitude do parâmetro de forma (TABELA 28).

O parâmetro de escala para o método da energia equivalente também demonstra valor inferior com maior desvio-padrão comparado aos obtidos por outros sistemas, refletindo no deslocamento da curva em relação ao eixo das abscissas na direção da origem.

Tabela 28 – Análise Estatística – Icapuí 2010

| ICAPUÍ - ANO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,78049000 | 4,95835370 | 0,03171011 | 0,01040205 | 0,95177522 | 0,02631742 | 0,00716490 | 0,98704875 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,84264070 | 4,95415280 | 0,03206970 | 0,01063930 | 0,95067529 | 0,02671834 | 0,00738486 | 0,98665115 |
| GRÁFICO | 2,80614290 | 4,90512150 | 0,03215951 | 0,01069897 | 0,95039865 | 0,02614705 | 0,00707243 | 0,98721590 |
| MOMENTO | 2,77304700 | 4,95884700 | 0,03166724 | 0,01037394 | 0,95190555 | 0,02626914 | 0,00713863 | 0,98709624 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,67709050 | 4,89234390 | 0,03153247 | 0,01028583 | 0,95231404 | 0,02517394 | 0,00655580 | 0,98814975 |
| MÁXIMA VEROSSIM. MODIFICADO | 2,67296490 | 4,88480450 | 0,03155430 | 0,01030007 | 0,95224799 | 0,02509719 | 0,00651588 | 0,98822191 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,28530020 | 4,63151526 | 0,03097468 | 0,00992515 | 0,95398618 | 0,02085891 | 0,00450097 | 0,99186405 |

Tabela 29 – Análise Comparativa velocidade dos ventos – Icapuí 2010

| ICAPUÍ - ANO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|---|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | ANÁLISE COMPARATIVA - VELOCIDADE DOS VENTOS | | | | | |
| | K | C | RMSE | RANKING | X ² | RANKING | R ² | RANKING |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,28530020 | 4,63151526 | 0,03097468 | 1 | 0,00992515 | 1 | 0,95398618 | 1 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,67709050 | 4,89234390 | 0,03153247 | 2 | 0,01028583 | 2 | 0,95231404 | 2 |
| MÁXIMA VEROSSIM. MODIFICADO | 2,67296490 | 4,88480450 | 0,03155430 | 3 | 0,01030007 | 3 | 0,95224799 | 3 |
| MOMENTO | 2,77304700 | 4,95884700 | 0,03166724 | 4 | 0,01037394 | 4 | 0,95190555 | 4 |
| EMPÍRICO | 2,78049000 | 4,95835370 | 0,03171011 | 5 | 0,01040205 | 5 | 0,95177522 | 5 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,84264070 | 4,95415280 | 0,03206970 | 6 | 0,01063930 | 6 | 0,95067529 | 6 |
| GRÁFICO | 2,80614290 | 4,90512150 | 0,03215951 | 7 | 0,01069897 | 7 | 0,95039865 | 7 |

Tabela 30 – Análise Comparativa potência eólica – Icapuí 2010

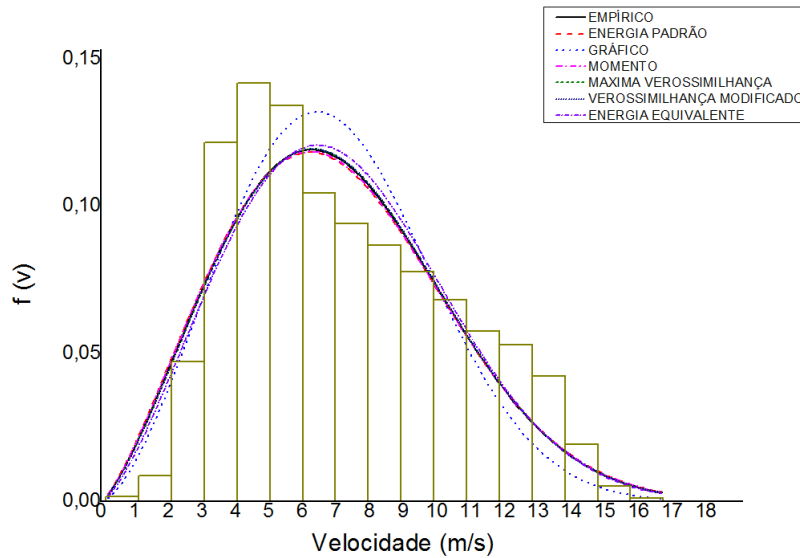
| ICAPUÍ - ANO 2010 | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|---------------------------------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | ANÁLISE COMPARATIVA - POTÊNCIA EÓLICA | | | | | |
| | K | C | RMSE | RANKING | X ² | RANKING | R ² | RANKING |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,28530020 | 4,63151526 | 0,02085891 | 1 | 0,00450097 | 1 | 0,99186405 | 1 |
| MÁXIMA VEROSSIM. MODIFICADO | 2,67296490 | 4,88480450 | 0,02509719 | 2 | 0,00651588 | 2 | 0,98822191 | 2 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,67709050 | 4,89234390 | 0,02517394 | 3 | 0,00655580 | 3 | 0,98814975 | 3 |
| GRÁFICO | 2,80614290 | 4,90512150 | 0,02614705 | 4 | 0,00707243 | 4 | 0,98721590 | 4 |
| MOMENTO | 2,77304700 | 4,95884700 | 0,02626914 | 5 | 0,00713863 | 5 | 0,98709624 | 5 |
| EMPÍRICO | 2,78049000 | 4,95835370 | 0,02631742 | 6 | 0,00716490 | 6 | 0,98704875 | 6 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,84264070 | 4,95415280 | 0,02671834 | 7 | 0,00738486 | 7 | 0,98665115 | 7 |

Os resultados apresentados pela TABELA 28 indicam que os valores gerados para os parâmetros de forma e de escala forneceram pequenos afastamentos, considerando as bases de dados formadas pela velocidade do vento e potência eólica. Os índices estatísticos comprovam e validam esta similaridade.

Confrontando as TABELAS 29 e 30 torna-se perceptível que na segunda os testes estatísticos produziram coeficientes de desempenho otimizados. Outro importante aspecto identificado trata da modificação sofrida na ordem de classificação alcançada pelo método gráfico.

As mudanças ocorridas estão relacionadas às distintas populações amostrais selecionadas e consideradas, acarretando variações tanto de ordem quantitativa quanto qualitativa, todavia verifica-se que há um bom nível de equivalência entre ambas.

Figura 36 – Distribuição de Weibull – Camocim 2005



Na ilustração representada (FIGURA 36) a curva gerada pelo método gráfico possui geometria mais acentuada, consequência da maior amplitude do parâmetro de forma (TABELA 31), o parâmetro de escala não contribuiu para grandes alterações.

Tabela 31 – Análise Estatística – Camocim 2005

| CAMOCIM - ANO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---|----------------|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - VELOCIDADE DO VENTO | | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | |
| | K | C | RMSE | X ² | R ² | RMSE | X ² | R ² |
| EMPÍRICO | 2,32043650 | 7,98431940 | 0,01128440 | 0,00131582 | 0,99269831 | 0,01699209 | 0,00298356 | 0,99807526 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,29545540 | 7,98535970 | 0,01117308 | 0,00128999 | 0,99284167 | 0,01696746 | 0,00297491 | 0,99808084 |
| GRÁFICO | 2,56450000 | 7,79695811 | 0,01265358 | 0,00165450 | 0,99081894 | 0,01687073 | 0,00294109 | 0,99810266 |
| MOMENTO | 2,30236620 | 7,98508710 | 0,01120366 | 0,00129706 | 0,99280242 | 0,01697413 | 0,00297725 | 0,99807933 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,33430140 | 8,01025810 | 0,01131808 | 0,00132369 | 0,99265467 | 0,01706774 | 0,00301018 | 0,99805808 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,33403490 | 8,00934370 | 0,01131787 | 0,00132364 | 0,99265494 | 0,01706532 | 0,00300933 | 0,99805864 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,39326430 | 8,07374290 | 0,01152190 | 0,00137179 | 0,99238773 | 0,01729226 | 0,00308990 | 0,99800666 |

Tabela 32 – Análise Comparativa velocidade dos ventos – Camocim 2005

| CAMOCIM - ANO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|------------|---|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | ANÁLISE COMPARATIVA - VELOCIDADE DOS VENTOS | | | | | |
| | K | C | RMSE | RANKING | X ² | RANKING | R ² | RANKING |
| ENERGIA PADRÃO | 2,29545540 | 7,98535970 | 0,01117308 | 1 | 0,00128999 | 1 | 0,99284167 | 1 |
| MOMENTO | 2,30236620 | 7,98508710 | 0,01120366 | 2 | 0,00129706 | 2 | 0,99280242 | 2 |
| EMPÍRICO | 2,32043650 | 7,98431940 | 0,01128440 | 3 | 0,00131582 | 3 | 0,99269831 | 3 |
| MÁXIMA VEROSSIM. MODIFICADO | 2,33403490 | 8,00934370 | 0,01131787 | 4 | 0,00132364 | 4 | 0,99265494 | 4 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,33430140 | 8,01025810 | 0,01131808 | 5 | 0,00132369 | 5 | 0,99265467 | 5 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,39326430 | 8,07374290 | 0,01152190 | 6 | 0,00137179 | 6 | 0,99238773 | 6 |
| GRÁFICO | 2,56450000 | 7,79695811 | 0,01265358 | 7 | 0,00165450 | 7 | 0,99081894 | 7 |

Tabela 33 – Análise Comparativa potência eólica – Camocim 2005

| CAMOCIM - ANO 2005 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------|------------|---------------------------------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|
| MÉTODOS | PARÂMETROS DE WEIBULL | | TESTES ESTATÍSTICOS - POTÊNCIA EÓLICA | | | | | |
| | K | C | RMSE | Ranking | X ² | Ranking | R ² | Ranking |
| GRÁFICO | 2,56450000 | 7,79695811 | 0,01687073 | 1 | 0,00294109 | 1 | 0,99810266 | 1 |
| ENERGIA PADRÃO | 2,29545540 | 7,98535970 | 0,01696746 | 2 | 0,00297491 | 2 | 0,99808084 | 2 |
| MOMENTO | 2,30236620 | 7,98508710 | 0,01697413 | 3 | 0,00297725 | 3 | 0,99807933 | 3 |
| EMPÍRICO | 2,32043650 | 7,98431940 | 0,01699209 | 4 | 0,00298356 | 4 | 0,99807526 | 4 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA MODIFICADO | 2,33403490 | 8,00934370 | 0,01706532 | 5 | 0,00300933 | 5 | 0,99805864 | 5 |
| MÁXIMA VEROSSIMILHANÇA | 2,33430140 | 8,01025810 | 0,01706774 | 6 | 0,00301018 | 6 | 0,99805808 | 6 |
| ENERGIA EQUIVALENTE | 2,39326430 | 8,07374290 | 0,01729226 | 7 | 0,00308990 | 7 | 0,99800666 | 7 |

7 CONCLUSÕES

Fundamentado nos experimentos executados nesta Dissertação podem ser enumeradas as seguintes conclusões:

1. Para a cidade de Icapuí os métodos numéricos que apresentaram os melhores ajustes foram aqueles que necessitaram de iteração; o método da energia equivalente foi superior no exercício dos três testes estatísticos, considerando as bases de dados composta pela velocidade dos ventos e de potência eólica.
2. Na cidade de Camocim o sistema que exibiu maior eficácia foi o método da energia padrão considerando os dados de velocidade dos ventos. Analisando a base guarnecida pela potência eólica este método atingiu o segundo resultado mais satisfatório.
3. Os dados de potência eólica apresentaram bom desempenho nos resultados submetidos e expostos através dos testes estatísticos, permanecendo seus valores bastante próximos daqueles encontrados por dados de velocidade dos ventos, devendo ser aproveitados em estudos futuros relacionados à área de concentração.
4. Não houve grandes discrepâncias entre os valores gerados, observou-se mudança considerável na ordem de classificação na cidade de Camocim para o método da energia equivalente quando foi alterada a sua base de dados para potência eólica. Como os valores obtidos para velocidade dos ventos foram mais significativos de acordo com a ordem de grandeza dos índices gerados, deve-se considerar preferencialmente a classificação estabelecida por este.
5. A análise estatística obtida a partir da base anual é mais representativa em comparação à mensal, haja vista que a plenitude do tamanho amostral é superior. Em virtude deste fato é recomendado que análises comparativas entre métodos numéricos sejam desenvolvidas primordialmente através das bases de dados que possuam maior quantidade de indivíduos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKDAG, S. A.; DINLER, A. **A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications.** Energy Conversion and Management, 50, p. 1761–1766, 2009.

AKPINAR, E. K.; AKPINAR, S. **Determination of the wind energy potential for Maden - Elazig.** Energy Conversion and Management, 45, p. 2901–2914, 2004.

AURÉLIO, M. F. **A distribuição de Weibull na descrição da estrutura diamétrica de *Eucalyptus Grandis*: um enfoque sobre o Método dos Momentos.** 2010. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

CELIK, A. N. **A statistical analysis of wind power density based on the Weibull and Rayleigh models at the southern region of Turkey.** Renewable Energy, 29, p. 593–604, 2003.

CHANG, T. P. **Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application.** Applied Energy, 88, p. 272–282, 2011.

CIEMAT. *Principios de la Conversion de la Energia Eólica.* Madrid – España, Segunda edición, 2002.

DAVENPORT, A. G. **The Relationship of Wind Structure to Wind Loading.** National Physics Laboratory, London – England, 1963.

DEAVES, D. M.; LINES, I. G. **On the fitting of low mean wind speed data to the Weibull distribution.** Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 66, p. 169-178, 1997.

DORVLO, A. S. S. **Estimating wind speed distribution.** Energy Conversion and Management, 43, p. 2311–2318, 2002.

ELLIOTT, D. L.; HOLLADAY, C. G.; BARCHER, W. R.; FOOTE, H. P.; SANDUSKY, W. F. **Wind Energy Resource Atlas of the United States**. Pacific North West Laboratory – USA, 1986.

FEITOSA, E. A. N.; SILVA, G. R.; PEREIRA, A. L.; VELEDA, D. E. A.; SILVA, C.C. **Panorama do Potencial Eólico no Brasil**. ANEEL, v. 68, Brasília, 2002.

FISHER, R. A. **Frequency Distribution of the Values of the Correlation Coefficient in Samples from an Indefinitely Large Population**. Biometrika, 10, p. 507-521, 1915.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA. **Registros Anemométricos da cidade de Icapuí – Ceará**. Fortaleza, 2010.

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo. **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Espírito Santo**. Vitória, 2009.

GHOSH, A. **A FORTRAN program for fitting Weibull distribution and generating samples**. Computers & Geosciences, 25, p. 729-738, 1999.

HALDANE, J. B. S.; PEARSON, K. **A centenary lecture delivered at University College London**. Studies in the History of Statistics and Probability, London - England, p. 427-438, 1970.

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

JUSTUS, C. G.; HARGRAVES, W. R.; YALCIN. **A Nationwide Assessment of Potential Output from Wind Powered Generators**. Journal Applied of Meteorology, 15, p. 673-678, 1976.

JUSTUS, C. G.; MIKHAIL, A. **Height Variation of Wind Speed and Wind Distribution Statistics**. ERDA ORO / 5108.76 / 4C60, 1978.

MCCLAVE, J. T.; DIETRICH, F. H.; **Statistics**. Second edition, University of Florida, 1982.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2012**. Brasília, 2012.

PEARSON, K. **Mathematical contributions to the theory of evolution. VII. On the correlation of characters not quantitatively measurable**. Philosophical Transactions of the Royal Society London, v. 195, p. 1-47, 1900.

PESSANHA, J. F. M. **Análise estatística de registros anemométricos e seleção de turbinas**. In: XLII SBPO, 2009, Rio Grande do Sul. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

PETERSEN, E. L.; JANSEN, N. O.; TROEN, I. **Extrapolation of mean Statistics with Special Regard to Wind Energy Applications**. World Climate Programme, National Laboratory, Roksild - Denmark, 1994.

ROCHA, P. A.; SOUSA, R. C.; ANDRADE, C. F.; SILVA, M. E. V. **Comparison of seven numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy generation in the northeast region of Brazil**. Applied Energy, 89, p. 395-400, 2012.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DO ESTADO DO CEARÁ. Engenharia e Consultoria em Energias SYS LTDA. **Balanco Energético do Estado do Ceará 2008**. Fortaleza, 2008.

SILVA, G. R. **Características de vento da Região Nordeste, Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais Eólicas**. 2003. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SOUSA, R. C. **Análise e comparação de sete métodos numéricos utilizados na determinação dos parâmetros da curva de Weibull aplicados aos dados de velocidade do vento coletados nas cidades de Paracuru e Camocim**. Dissertação de Mestrado, 2011. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

STEVENS, M. J.; SMULDERS, P. T. **The estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy utilization purposes.** Wind Engineering, 3, p. 132-145, 1979.

STRACK, M. **Analysis of Uncertainties in Energy Yield Calculation of Wind Farm Projects.** DEWI Magazine, Germany, 22, p. 52-62, 2003.

STURGES, H. **The choice of a class interval.** Journal of the American Statistical Association, 21, p. 65-66, 1926.

WEIBULL, W. **A statistical distribution of wide applicability.** Journal of Applied Mechanics, Stockholm - Sweden, p. 293-297, September 1951.

ZHOU, W.; YANG, H.; FANG, Z. **Wind power potential and characteristic analysis of the Pearl River Delta region, China.** Renewable Energy, 31, p. 739-753, 2005.

ANEXOS

ANEXO A – Capacidade instalada de geração de energia elétrica no Brasil (2011)

| ESTADO | HIDRO | | | TERMO | | | EÓLICA | | | NUCLEO | TOTAL | | | STATE |
|---------------------|--------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|-----|-------|---------|--------|--------|---------|---------------------|
| | HYDRO | | | THERMAL | | | WIND | | | NUCLEAR | TOTAL | | | |
| | SP | APE | TOTAL | SP | APE | TOTAL | SP | APE | TOTAL | SP | SP | APE | TOTAL | |
| BRASIL | 78.023 | 4.436 | 82.459 | 17.774 | 13.489 | 31.243 | 1.425 | 0 | 1.425 | 2.007 | 99.230 | 17.905 | 117.135 | BRAZIL |
| NORTE | 11.269 | 144 | 11.513 | 3.612 | 402 | 4.015 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.011 | 558 | 15.569 | NORTH |
| Rorônia | 305 | 6 | 311 | 497 | 34 | 532 | 0 | 0 | 0 | 0 | 814 | 40 | 854 | Rorônia |
| Acre | 0 | 0 | 0 | 154 | 2 | 157 | 0 | 0 | 0 | 0 | 158 | 2 | 161 | Acre |
| Amazonas | 502 | 25 | 527 | 2.340 | 27 | 2.367 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.901 | 54 | 2.955 | Amazonas |
| Roraima | 5 | 0 | 5 | 189 | 10 | 200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 199 | 10 | 210 | Roraima |
| Para | 8.499 | 1 | 8.500 | 171 | 327 | 498 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8.626 | 337 | 8.963 | Para |
| Amapá | 77 | 0 | 77 | 260 | 1 | 261 | 0 | 0 | 0 | 0 | 344 | 1 | 344 | Amapá |
| Tocantins | 1.981 | 113 | 2.093 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.989 | 113 | 2.082 | Tocantins |
| NORDESTE | 11.076 | 294 | 11.369 | 3.821 | 2.054 | 5.875 | 852 | 0 | 852 | 0 | 15.780 | 2.351 | 18.131 | NORTHEAST |
| Maranhão | 330 | 111 | 440 | 323 | 112 | 435 | 0 | 0 | 0 | 0 | 659 | 226 | 885 | Maranhão |
| Piauí | 119 | 0 | 119 | 51 | 9 | 60 | 18 | 0 | 18 | 0 | 189 | 9 | 198 | Piauí |
| Ceará | 5 | 0 | 5 | 852 | 21 | 873 | 521 | 0 | 521 | 0 | 1.397 | 21 | 1.418 | Ceará |
| Rio Grande do Norte | 0 | 0 | 0 | 474 | 76 | 550 | 222 | 0 | 222 | 0 | 709 | 76 | 784 | Rio Grande do Norte |
| Paraíba | 4 | 0 | 4 | 497 | 57 | 554 | 66 | 0 | 66 | 0 | 580 | 57 | 637 | Paraíba |
| Pernambuco | 754 | 11 | 765 | 822 | 327 | 1.149 | 25 | 0 | 25 | 0 | 1.818 | 338 | 1.956 | Pernambuco |
| Alagoas | 3.738 | 4 | 3.742 | 0 | 261 | 261 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3.716 | 365 | 3.981 | Alagoas |
| Sergipe | 1.588 | 0 | 1.588 | 0 | 66 | 66 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.579 | 66 | 1.645 | Sergipe |
| Bahia | 4.537 | 169 | 4.706 | 802 | 1.125 | 1.927 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5.334 | 1.293 | 6.627 | Bahia |
| SUDESTE | 22.583 | 2.046 | 24.629 | 6.040 | 8.171 | 14.211 | 28 | 0 | 28 | 2.007 | 30.578 | 10.211 | 40.889 | SOUTHEAST |
| Minas Gerais | 10.574 | 1.319 | 11.893 | 309 | 1.402 | 1.711 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10.829 | 2.719 | 13.545 | Minas Gerais |
| Espírito Santo | 417 | 110 | 527 | 375 | 700 | 1.074 | 0 | 0 | 0 | 0 | 794 | 810 | 1.604 | Espírito Santo |
| Rio de Janeiro | 1.172 | 15 | 1.187 | 4.144 | 913 | 5.057 | 28 | 0 | 28 | 2.007 | 7.451 | 930 | 8.380 | Rio de Janeiro |
| São Paulo | 10.420 | 802 | 11.022 | 1.213 | 5.156 | 6.369 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11.604 | 5.756 | 17.360 | São Paulo |
| SUL | 21.923 | 1.608 | 23.531 | 3.055 | 1.194 | 4.249 | 544 | 0 | 544 | 0 | 25.475 | 2.793 | 28.268 | SOUTH |
| Paraná | 14.541 | 141 | 14.682 | 491 | 462 | 1.142 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14.664 | 793 | 14.747 | Paraná |
| Santa Catarina | 2.799 | 822 | 3.621 | 834 | 236 | 1.070 | 306 | 0 | 306 | 0 | 3.845 | 1.054 | 4.899 | Santa Catarina |
| Rio Grande do Sul | 3.583 | 645 | 4.227 | 1.731 | 305 | 2.036 | 338 | 0 | 338 | 0 | 5.676 | 947 | 6.622 | Rio Grande do Sul |
| CENTRO-OESTE | 11.073 | 344 | 11.417 | 1.245 | 1.549 | 2.894 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.286 | 1.992 | 14.278 | CENTER-WEST |
| Mato Grosso do Sul | 3.596 | 4 | 3.602 | 452 | 761 | 1.214 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.041 | 766 | 4.807 | Mato Grosso do Sul |
| Mato Grosso | 1.529 | 180 | 1.709 | 546 | 74 | 620 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.081 | 253 | 2.334 | Mato Grosso |
| Goias | 5.916 | 160 | 6.075 | 237 | 810 | 1.047 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.124 | 970 | 7.094 | Goias |
| Distrito Federal | 30 | 0 | 30 | 10 | 4 | 13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 4 | 43 | Distrito Federal |

SP - Serviço Público (inclui Produtores Independentes). / SP - Public Service (it includes Independent Producers).

APE - Autoprodutor (não inclui usinas hidrelétricas em consórcio com concessionárias de Serviço Público, como Igarapava, Canoas I e II, Funil, Porto Estrela, Machadinho e outras). / APE - Self Producers (excluding the partnership between hydroelectric plants with Public Service concessionaries, as: Igarapava, Canoas I and II, Funil, Porto Estrela, Machadinho and other).

Fonte: Balanço Energético Nacional (2012).

ANEXO B – Evolução da produção de energia primária - Brasil

| | | | | | | | | | | | % |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---|
| FONTES | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | SOURCES |
| NÃO RENOVÁVEL | 54,9 | 53,0 | 52,2 | 52,7 | 52,6 | 51,3 | 51,6 | 53,1 | 52,6 | 54,2 | NON-RENEWABLE ENERGY |
| PETRÓLEO | 43,0 | 42,0 | 40,3 | 42,0 | 42,1 | 40,6 | 39,7 | 42,1 | 42,1 | 42,4 | PETROLEUM |
| GÁS NATURAL | 8,8 | 8,5 | 8,9 | 8,8 | 8,3 | 8,1 | 9,0 | 8,7 | 9,0 | 9,3 | NATURAL GAS |
| CARVÃO VAPOR | 1,1 | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | STEAM COAL |
| CARVÃO METALÚRGICO | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | METALLURGICAL COAL |
| URÂNIO (U ₂ O ₅) | 1,9 | 1,5 | 1,9 | 0,7 | 1,1 | 1,6 | 1,7 | 1,4 | 0,7 | 1,6 | URANIUM - U ₂ O ₅ |
| RENOVÁVEL | 45,1 | 47,0 | 47,8 | 47,3 | 47,4 | 48,7 | 48,4 | 46,9 | 47,4 | 45,8 | RENEWABLE ENERGY |
| ENERGIA HIDRÁULICA | 14,1 | 14,3 | 14,5 | 14,5 | 14,2 | 14,4 | 13,4 | 14,0 | 13,7 | 14,3 | HYDRAULIC |
| LENHA | 13,6 | 14,1 | 14,8 | 14,2 | 13,5 | 12,8 | 12,4 | 10,3 | 10,3 | 10,3 | FIREWOOD |
| PRODUTOS DA CANA-DE-AÇÚCAR | 14,5 | 15,4 | 15,4 | 15,5 | 16,6 | 18,1 | 19,0 | 18,7 | 19,3 | 16,9 | SUGAR CANE PRODUCTS |
| OUTRAS RENOVÁVEIS | 2,9 | 3,1 | 3,1 | 3,2 | 3,2 | 3,4 | 3,6 | 3,9 | 4,1 | 4,4 | OTHERS |
| TOTAL | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | TOTAL |
| | | | | | | | | | | | TDP tep (toe) |
| IDENTIFICAÇÃO | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | IDENTIFICATION |
| ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | 116.669 | 113.348 | 120.103 | 121.350 | 124.464 | 128.321 | 136.616 | 128.726 | 147.569 | 152.265 | NON-RENEWABLE ENERGY |
| PETRÓLEO E DERIVADOS | 85.152 | 80.688 | 83.648 | 84.553 | 85.545 | 89.239 | 92.410 | 92.263 | 101.714 | 105.172 | PETROLEUM AND OIL PRODUCTS |
| GÁS NATURAL | 14.809 | 15.512 | 19.061 | 20.526 | 21.716 | 22.198 | 25.934 | 21.329 | 27.536 | 27.715 | NATURAL GAS |
| CARVÃO MINERAL E COQUE | 13.010 | 13.527 | 14.225 | 13.721 | 13.537 | 13.575 | 14.562 | 11.706 | 14.462 | 15.236 | COAL AND COKE |
| URÂNIO (U ₂ O ₅) | 3.698 | 3.621 | 3.170 | 2.549 | 3.667 | 3.309 | 3.709 | 3.428 | 3.857 | 4.143 | URANIUM - U ₂ O ₅ |
| ENERGIA RENOVÁVEL | 81.890 | 88.206 | 93.642 | 97.317 | 101.884 | 109.690 | 116.037 | 115.074 | 121.203 | 120.315 | RENEWABLE ENERGY |
| HIDRÁULICA E ELETRICIDADE ¹ | 27.749 | 29.477 | 30.804 | 32.379 | 33.537 | 35.505 | 35.412 | 37.036 | 37.663 | 39.922 | HYDRAULIC AND ELECTRICITY ¹ |
| LENHA E CARVÃO VEGETAL | 23.648 | 25.973 | 28.203 | 28.468 | 28.589 | 28.628 | 29.227 | 24.610 | 25.998 | 26.322 | FIREWOOD AND CHARCOAL |
| DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR | 25.438 | 27.093 | 28.775 | 30.150 | 33.003 | 37.852 | 42.872 | 43.978 | 47.302 | 42.777 | SUGAR CANE PRODUCTS |
| OUTRAS RENOVÁVEIS | 5.055 | 5.663 | 5.860 | 6.320 | 6.754 | 7.705 | 8.526 | 9.450 | 10.440 | 11.093 | OTHERS |
| TOTAL | 198.560 | 201.554 | 213.744 | 218.667 | 226.348 | 238.011 | 252.653 | 243.800 | 268.771 | 272.580 | TOTAL |

Fonte: Balanço Energético Nacional (2012).

ANEXO C – Evolução do Consumo final de energia por setor - Brasil

| IDENTIFICAÇÃO | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 10 ⁹ tep (tce) | IDENTIFICATION |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------------|----------------------------------|
| CONSUMO FINAL | 178.436 | 182.245 | 191.419 | 196.182 | 203.261 | 215.197 | 226.784 | 221.307 | 241.118 | 246.636 | | FINAL CONSUMPTION |
| CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO | 12.615 | 12.492 | 12.976 | 13.222 | 14.324 | 14.166 | 14.676 | 14.921 | 17.686 | 17.717 | | FINAL NON-ENERGY CONSUMPTION |
| CONSUMO FINAL ENERGÉTICO | 165.821 | 169.753 | 178.443 | 182.960 | 188.937 | 201.031 | 212.108 | 206.386 | 223.433 | 228.919 | | FINAL ENERGY CONSUMPTION |
| SETOR ENERGÉTICO | 14.394 | 15.832 | 16.442 | 17.653 | 18.823 | 21.049 | 24.546 | 23.916 | 24.263 | 22.376 | | ENERGY SECTOR |
| RESIDENCIAL | 20.692 | 20.902 | 21.357 | 21.827 | 22.090 | 22.271 | 22.738 | 23.129 | 23.562 | 23.374 | | RESIDENTIAL |
| COMERCIAL | 4.937 | 4.994 | 5.188 | 5.452 | 5.631 | 5.935 | 6.190 | 6.335 | 6.731 | 7.124 | | COMMERCIAL |
| PÚBLICO | 3.188 | 3.216 | 3.273 | 3.451 | 3.453 | 3.557 | 3.567 | 3.648 | 3.636 | 3.758 | | PUBLIC |
| AGROPECUÁRIO | 7.811 | 8.152 | 8.278 | 8.361 | 8.554 | 9.067 | 9.911 | 9.553 | 10.029 | 9.882 | | AGRICULTURE AND LIVESTOCK |
| TRANSPORTES - TOTAL | 49.400 | 48.291 | 51.690 | 52.720 | 53.630 | 58.019 | 62.829 | 63.041 | 69.720 | 73.989 | | TRANSPORTATION - TOTAL |
| RODOVIÁRIO | 44.456 | 44.329 | 47.334 | 48.073 | 49.067 | 52.892 | 57.370 | 57.683 | 63.963 | 67.896 | | HIGHWAYS |
| FERROVIÁRIO | 773 | 767 | 868 | 926 | 1.040 | 1.115 | 1.149 | 1.125 | 1.135 | 1.148 | | RAILROADS |
| AÉREO | 3.135 | 2.241 | 2.292 | 2.596 | 2.435 | 2.674 | 2.857 | 2.874 | 3.241 | 3.623 | | AIRWAYS |
| HIDROVIÁRIO | 1.036 | 954 | 1.096 | 1.124 | 1.088 | 1.338 | 1.452 | 1.359 | 1.380 | 1.323 | | WATERWAYS |
| INDUSTRIAL - TOTAL | 65.299 | 68.367 | 72.217 | 73.497 | 76.757 | 81.133 | 82.327 | 76.764 | 85.491 | 88.416 | | INDUSTRIAL - TOTAL |
| CIMENTO | 3.134 | 2.808 | 2.648 | 2.831 | 3.087 | 3.365 | 3.742 | 3.694 | 4.157 | 4.638 | | CEMENT |
| FERRO-GUSA E AÇO | 15.736 | 16.701 | 17.945 | 17.459 | 16.985 | 17.664 | 18.229 | 13.478 | 16.445 | 17.669 | | PIG-IRON AND STEEL |
| FERRO-LIGAS | 1.135 | 1.470 | 1.563 | 1.613 | 1.613 | 1.803 | 1.811 | 1.447 | 1.695 | 1.555 | | IRON-ALLOYS |
| MINERAÇÃO E PELOTIZAÇÃO | 2.356 | 2.495 | 2.642 | 2.905 | 3.013 | 3.195 | 3.349 | 2.343 | 3.182 | 3.289 | | MINING/PELLETIZATION |
| NÃO-FERROSOS E OUTROS DA METALURGIA | 4.517 | 5.014 | 5.298 | 5.430 | 5.694 | 5.954 | 5.975 | 5.361 | 6.492 | 6.885 | | NON-FERROUS/ OTHER METALLURGICAL |
| QUÍMICA | 6.596 | 6.547 | 7.115 | 7.168 | 7.364 | 7.715 | 7.209 | 7.350 | 7.214 | 7.464 | | CHEMICAL |
| ALIMENTOS E BEBIDAS | 15.845 | 16.659 | 17.599 | 17.926 | 20.122 | 21.262 | 20.694 | 21.547 | 23.244 | 22.972 | | FOODS AND BEVERAGES |
| TÊXTIL | 1.117 | 1.080 | 1.186 | 1.202 | 1.213 | 1.275 | 1.208 | 1.172 | 1.212 | 1.201 | | TEXTILES |
| PAPEL E CELULOSE | 6.591 | 7.120 | 7.299 | 7.684 | 8.016 | 8.555 | 8.957 | 9.346 | 10.056 | 10.180 | | PAPER AND PULP |
| CERÂMICA | 3.058 | 3.126 | 3.215 | 3.412 | 3.533 | 3.841 | 4.157 | 4.107 | 4.455 | 4.672 | | CERAMICS |
| OUTROS | 5.313 | 5.346 | 5.707 | 5.866 | 6.118 | 6.504 | 6.997 | 6.919 | 7.338 | 7.891 | | OTHERS |
| CONSUMO NÃO-IDENTIFICADO | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | UNIDENTIFIED CONSUMPTION |

Fonte: Balanço Energético Nacional (2012).

