

# Aplicação da Distribuição de Probabilidade de Weibull nos Estudos Eólicos de Pernambuco

**Marinho, M. H. N.**

Escola Politécnica de Pernambuco  
Universidade de Pernambuco  
50.720-001 - Recife, Brasil  
marinho75@poli.br

**Siqueira, R. N.**

Escola Politécnica de Pernambuco  
Universidade de Pernambuco  
50.720-001 - Recife, Brasil  
renatosiqueira@hotmail.com

## Resumo

*Neste trabalho, o objetivo foi estudar o potencial eólico de Pernambuco, para tal exploração, utilizou-se neste estudo a melhor distribuição estatística aplicada às ocorrências do vento na região Nordeste do Brasil, que tem sido apontada como a função de densidade de probabilidade de Weibull. Os dados de velocidade de vento (2005 a 2010) e das vazões afluentes (1931 a 2010) foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/ 3º Distrito de Meteorologia, e ao Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Foi feito um comparativo com um período de cheia e com um período de seca dos rios, mostrando que há uma variação significativa do período de cheia para um período de seca, na energia eólica gerada, ambos os comparativos são feitos com a vazão afluente da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Comprovou-se neste estudo hipotético que a variação de energia eólica gerada é mínima, pois a geração eólica no período de seca foi de aproximadamente 269 MWh/h e no período de cheia foi de 264 MWh/h.*

**Palavras-Chave:** Complementaridade; Energia Eólica; Regime Hidrológico; Geração Hidroeólica; Distribuição de Probabilidade de Weibull

## Abstract

*In this work, the objective was to study the wind potential of Pernambuco, to such exploitation, was used in this study the best statistical distribution applied to instances of the wind in the Northeast region of Brazil, which has been identified as the probability density function of Weibull. The data of wind speed (2005-2010) and inflows (1931-2010) were obtained from the National Institute of Meteorology - INMET / 3rd District of Meteorology and the National Electric System Operator - ONS. A comparison was made with a full period and a period of dry rivers, showing that there is a significant variation of the full period for a period of drought, wind power generated, both comparisons are made with the inflow of Plant hydroelectric Sobradinho. It was proved in this case study that the variation of wind power generated is minimal since the wind generation during the dry period was approximately 269 MWh/h during the flooding was 264 MWh/h.*

**Keywords:** Complementary, Wind Energy, Hydrological Regime; Generation Hidroeólica; Weibull Probability Distribution.

## 1 Introdução

A energia armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas para o planejamento de longo e médio prazo é discretizada mensal ou semanalmente nos horizontes de estudo e apresenta variações, devido à disponibilidade hídrica natural, apresenta flutuações sazonais com amplitude significativa. Os períodos secos requerem estratégias de otimização da gestão dos reservatórios para evitar racionamentos de energia com fontes de energia renováveis (MARINHO, 2012).

A energia eólica pode contribuir de forma relevante para resolver o grande dilema do uso da água dos rios nordestinos (água para gerar eletricidade versus água para irrigação/abastecimento), pois se percebe que as maiores velocidades de vento no nordeste do Brasil ocorrem justamente quando o fluxo de água dos rios é mínimo, foi feito um comparativo com um período de cheia e com um período de seca, mostrando que há uma variação significativa do período de cheia para um período de seca na variação de energia eólica gerada, ambos os comparativos são feitos com a vazão afluente da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. As centrais eólicas hipotéticas neste estudo foram Triunfo, Surubim, Recife, Ouricuri, Pesqueira, Petrolina, Garanhuns, Cabrobó e Arcoverde, instaladas no estado de Pernambuco no nordeste do Brasil, elas poderão produzir grandes quantidades de energia elétrica evitando que se tenha que utilizar a água dos rios, principalmente no período de seca.

Os dados de velocidade de vento de 2005 a 2012 das estações meteorológicas foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/ 3º Distritos de Meteorologia - DISME. Utilizaram-se as vazões afluentes médias mensais da série histórica de 74 anos (1931 a 2010) do posto hidrológico da usina hidrelétrica de Sobradinho.

Na tentativa estudar o potencial eólico de Pernambuco, foi escolhida a distribuição de probabilidade de Weibull, segundo MARINHO et al. (2006) e MARINHO e AQUINO (2009) que comprovaram com estudos hipotéticos. Comparando-a com a distribuição Rayleigh também utilizada em estudos eólicos, segundo Bernardo et al. (2002), Na Arábia Saudita, Sahin & Aksakal (1998) usaram as distribuições de Weibull e Rayleigh para avaliar o desempenho de um sistema eólico e concluíram que os resultados alcançados com os dados experimentais se aproximaram melhor daqueles gerados com o modelo de Weibull, com erro relativo de apenas 3,46%.

A partir dos dados de velocidade de vento se obteve a velocidade de vento para torres instaladas hipoteticamente nas 9 (nove) centrais eólicas citadas, a 85, 98 e 120 metros de altura. Para as devidas simulações foi utilizada a curva de potência do aerogerador da ENERCON E-92 2.3 MW.

Estas etapas de simulação foram realizadas com o auxílio de ferramentas computacionais, tais como: MATLAB (2010) e Microsoft Office Excel 2007.

No presente trabalho foram desenvolvidos cálculos utilizando a distribuição de Weibull que modelam a velocidade de vento de acordo com as características locais, essa modelagem depende de dois parâmetros que são  $k$  (de forma) e  $c$  (de escala), assim possibilitando obter a energia eólica gerada hipoteticamente para as alturas estabelecidas. Desta forma, é possível utilizar os resultados destas previsões para programar soluções para os períodos secos que requerem estratégias de otimização da gestão dos reservatórios, utilizando a vazão economizada pela geração eólica principalmente em períodos de seca, para que se possam evitar como, por exemplo, racionamentos.

## 2 Distribuição de Probabilidade de Weibull nos Estudos Eólicos

As primeiras aplicações da distribuição de Weibull em estudos eólicos se restringiam à representação da distribuição de velocidades em análises dos carregamentos de vento [Danvenport, 1963]. Treze anos após, foi constatado que para a maioria das ocorrências de vento a distribuição de Weibull fornece um bom ajuste [Justus et al., 1976] [Hennessey, 1977].

Em particular, Hennessey examinou as propriedades da distribuição de Weibull em seus detalhes e constatou que existe uma forte relação entre os momentos da velocidade de vento e os parâmetros  $k$  e  $c$ . Notou, ainda, que os mínimos parâmetros estatísticos requeridos para se estimar o potencial energético do vento são a velocidade média e o desvio padrão da série temporal.

### 2.1 Estilos

A função densidade de probabilidade do método de Weibull é um caso especial da distribuição de Pearson tipo III ou da função de distribuição de Gama generalizada com dois parâmetros. Se uma distribuição de vento pode ser representada pela função de densidade de probabilidade de Weibull, ROHATGI e NELSON (1994), ela então é regida pela seguinte equação:

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

Onde  $k > 0$ ,  $c > 0$  e  $v > 0$  em que  $k$  é o parâmetro de fator de forma,  $c$  é chamado de fator de escala e  $v$  é a velocidade de vento. A função do MS Excel 2007 que representa Eq.(1) é: =WEIBULL(x, alfa, beta, cumulativo), onde  $x$  é a velocidade  $v$ , **alfa** é  $k$  e **beta**  $c$ , **cumulativo** é um valor booleano que pode ser **FALSE** (falso) que se

refere a Eq.(1) ou **TRUE** (verdadeiro) que se refere a distribuição cumulativa Weibull que não é utilizada no presente trabalho.

O valor médio das velocidades dos ventos de um local com as características de Weibull é expresso pela seguinte equação:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \cdot \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv \quad (2)$$

em que se usando a função gama, o valor médio da velocidade de vento pode ser encontrado de modo simplificado através da equação:

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

em que  $\Gamma$  é função gama.

Existem diversos métodos disponíveis para se determinar os valores dos parâmetros de  $k$  e  $c$  a partir dos dados de vento medidos em um local.

Os parâmetros de distribuição de Weibull foram calculados utilizando o Método da Velocidade Média e Desvio Padrão. Considerando os valores da velocidade média, calculada para as alturas de 85, 98 e 120 metros de altura, a partir dos dados de velocidade de vento de 2005 a 2012 das estações meteorológicas medidas à 10 metros de altura de 9 (nove) estações anemométricas, pela equação empírica GIPE (1993) e LYSEN (1982):

$$v(h) = v_1 \left(\frac{h}{h_1}\right)^\alpha \quad (4)$$

em que:

- $v_1$  – velocidade na altura  $h_1$  (conhecida),
- $v(h)$  – velocidade na altura  $h$ ,
- $h$  – altura para velocidade  $v(h)$ ,
- $h_1$  – altura da velocidade  $v_1$ ,
- $\alpha$  – coeficiente dependente da natureza do terreno.

O desvio padrão foi obtido pela função do MS Excel 2007 =**DESVPAD(núm1;núm2,...)**, a partir dos dados de velocidade de vento de 2005 a 2012 das estações meteorológicas medidas a 10 metros de altura de 9 (nove) estações anemométricas.

Considerando os valores da velocidade média e desvio padrão. O valor de  $k$  pode ser obtido a partir de cálculo direto, segundo (CIEMAT, 2002), que se baseia em experimentos empíricos. Em que (GUSTAVO, 2003):

- Para vento de baixa variabilidade ( $\sigma/v(h) \approx 0,1$ ):  $k = 1.05 \cdot \sqrt{v(h)}$  (5)

- Para vento de baixa variabilidade ( $\sigma/v(h) \approx 0,5$ ):  $k = 0.94 \cdot \sqrt{v(h)}$  (6)

- Para vento de baixa variabilidade ( $\sigma/v(h) \approx 0,9$ ):  $k = 0.83 \cdot \sqrt{v(h)}$  (7)

onde  $\sigma$  é o desvio padrão.

O valor de  $c$  pode ser obtido diretamente pela equação:

$$c = \frac{v(h)}{\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)} \quad (8)$$

## 2.2 Geração Eólica

O principal foco da simulação do potencial eólico reside na necessidade de se estimar qual a potência média suprida pelas turbinas eólicas durante um mês normal de operação. Desta maneira, a seguir indicamos a forma pela qual encontramos o potencial.

A potência convertida por uma turbina eólica pode ser expressa através da equação:

$$P_{Turbina} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \theta) \quad (9)$$

em que  $v$  é a velocidade de vento,  $A$  é a área varrida pelas pás em  $m^2$ ,  $\rho$  é a densidade do ar em  $kg/m^3$ ,  $C_p(\lambda, \theta)$  é o coeficiente de potência, um parâmetro que pode ser calculado ou estimado para uma turbina eólica com base na eficiência da conversão eólica e eletromecânica, finalmente,  $P_{turbina}$  é a potência elétrica instantânea fornecida por uma turbina eólica em watts.

A Eq. (9) revela que a potência disponível é fortemente dependente da velocidade do vento: quando esta duplica, a potência aumenta oito vezes, mas duplicando a área varrida pelas pás da turbina, o aumento é só de duas vezes. Por outro lado, se a velocidade do vento desce para metade, a potência reduz-se a 12,5%. Tudo isto explica a importância crítica da colocação das turbinas em locais com velocidades do vento elevadas no sucesso econômico dos projetos de energia eólica.

Quanto mais baixa a temperatura, mais moléculas de ar existem por metro cúbico. Por isso, o potencial eólico é maior quando a densidade do ar é maior, ou seja, quando está mais frio.

A densidade do ar  $\rho$  varia de acordo com a altitude (pois tem uma relação com a pressão atmosférica) e com a temperatura do ar, deste modo a potência convertida por uma turbina eólica depende linearmente com a densidade

do ar. A densidade do se relaciona com a pressão e com a temperatura conforme a equação seguinte:

$$\rho = 1.2929 \cdot \frac{P_{Local}}{760} \cdot \frac{273}{T_{Local}} \quad (10)$$

em que  $P_{Local}$  é a pressão atmosférica em milímetros de mercúrio no local de instalação e  $T_{Local}$  é a temperatura local em Kelvin.

Verifica-se também que a potência convertida por uma turbina eólica também depende da velocidade do vento, neste caso com uma relação cúbica. Desta maneira a simples aplicação da velocidade média do vento nas equações conduz a um valor de potência média produzida pela turbina eólica muito inferior ao real.

Considerando que a potência de uma a turbina eólica também pode ser expressa pela Curva de Potência CP da mesma a equação da potência gerada por uma turbina eólica se torna mais simples. A curva CP já integra todas as funções apresentadas acima sendo ela medida em turbinas eólicas em condições de testes padrão o que demanda um fator de correção conforme indicado na equação a seguir:

$$P_{Turbina} = fd \cdot CP(v) \quad (11)$$

em que  $fd$  é um fator de correção para levar em consideração as variações da densidade do ar para diferentes alturas e temperaturas uma vez que as curvas de potência são calculadas para condições padrões, i.e. ao nível do mar e 15°C e  $CP(v)$  é a curva de potência da turbina eólica medida em condições padrões.

A potência elétrica média gerada por uma turbina eólica pode ser calculada através da seguinte equação:

$$P_{média} = \int P_{Turbina}(v) \cdot f(v)dv \quad (12)$$

em que  $P_{Turbina}(v)$  é a curva de potência da turbina eólica corrigida para o local como função do vento,  $f(v)$  é a função de densidade de probabilidade de vento neste caso de Weibull. Considerando a curva de potência de uma turbina eólica como sendo em pu (normalizada em relação a sua potência nominal), a potência média pode ser indicada como um valor em pu diretamente através da integração da Eq. (12).

O atrito entre a superfície terrestre e o vento tem como consequência um retardamento deste último. As camadas mais baixas de ar retardam as que lhe estão por cima, resultando numa variação da velocidade média do vento com a altura ao solo. O efeito da força de atrito vai-se desvanecendo até praticamente se anular a uma altura de aproximadamente 2.000 metros.

No solo, a condição fronteira obriga a que a velocidade do escoamento seja nula. A esta zona da atmosfera caracterizada pela variação da velocidade do vento com a altura, chama-se camada limite atmosférica; acima desta zona diz-se que a atmosfera é livre.

A figura 1 mostra a representação da curva do aerogerador da ENERCON E-92 2.3 MW e a tabela 1 mostra a curva de potência do aerogerador.

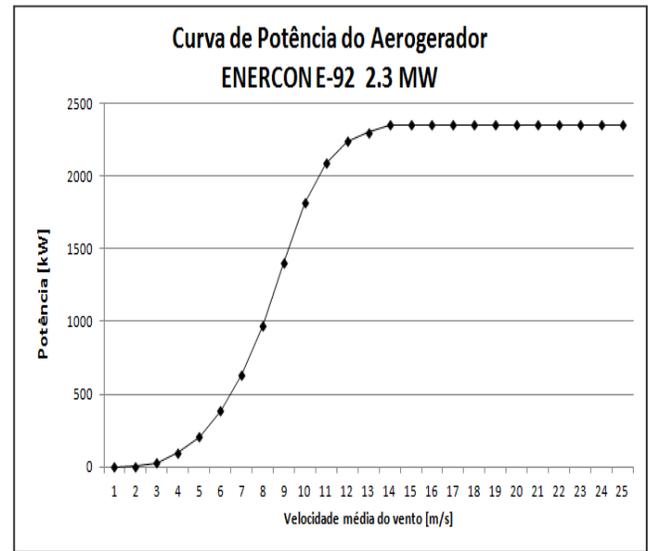


Figura 1 – Curva de Potência do Aerogerador.

Tabela 1 – Curva de Potência do Aerogerador ENERCON E-92 2.3 MW

v (m/s)	Potência (kW)
1,00	0
2,00	3,6
3,00	29,9
4,00	98,2
5,00	208,3
6,00	384,3
7,00	637,0
8,00	975,8
9,00	1403,6
10,00	1817,8
11,00	2088,7
12,00	2237
13,00	2300
14,00	2350
15,00	2350
16,00	2350

17,00	2350
18,00	2350
19,00	2350
20,00	2350
21,00	2350
22,00	2350
23,00	2350
24,00	2350
25,00	2350

FONTE: ENERCON, Energy for the World,2011.

A energia anual esperada para cada aerogerador é determinada através da sequência de cálculos apresentada a seguir:

1. Utilizaram-se as velocidades médias mensais do período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010 medidos à 10 metros de altura de 9 (nove) estações anemométricas em municípios do Estado de Pernambuco na região Nordeste do Brasil, essas velocidades são modeladas pela eq. (4) para as alturas de 85, 98 e 120 metros, para as torres eólicas hipotéticas;
2. A partir destes valores modelados é calculado o parâmetro k mensal eq. (5), (6) e (7) a escolha da equação adequada entre as três para o cálculo de k dependeu da variabilidade da velocidade do vento obtida pela equação  $\sigma/v(h)$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão das velocidades médias mensais e  $v(h)$  é a velocidade modelada por eq. (4), devendo-se respeitar as condições citadas anteriormente no presente trabalho. O parâmetro c mensal é calculado pela eq. (8);
3. A frequência calculada pela distribuição de Weibull é obtida por eq.(1) para os valores de k, c e v, onde v é a velocidade fornecida pelo fabricante do aerogerador a ser testada;
4. O valor da energia esperada (Ee) é calculado pela equação:

$$Ee = f(v) \cdot n \cdot P_{Turbina} \cdot \frac{m_{ar\ local}}{m_{ar\ padrão}} \quad (13)$$

Onde  $f(v)$  é a frequência da distribuição de Weibull,  $n$  é número de horas,  $P_{Turbina}$  é a potência [kW] do vento “aproveitada” pelo aerogerador (valores fornecidos pelo fabricante – Tabela 1),  $m_{ar\ local}$  é massa específica do ar local l em  $kg/m^3$  e  $m_{ar\ padrão}$  é a massa específica do ar padrão em  $kg/m^3$ . Pode-se usar a função do MS Excel 2007 =WEIBULL(x,alfa,beta,FALSE)\*n

\* $P_{Turbina} * m_{ar\ local} / m_{ar\ padrão}$ , onde x é a velocidade v, alfa é k e beta c ;

5. O somatório dos valores representa a energia total esperada  $E_{ea(Total)}$  em kWh durante o ano.

### 3 Estudo de Caso

A área do Nordeste brasileiro é de aproximadamente 1.558.196 km<sup>2</sup>, equivalente a 18% do território nacional e é a região que possui a maior costa litorânea. Está situado entre os paralelos de 01° 02' 30" de latitude norte e 18° 20' 07" de latitude sul e entre os meridianos de 34° 47' 30" e 48° 45' 24" a oeste do meridiano de Greenwich. Limita-se a norte e a leste com o Oceano Atlântico; ao sul com os estados de Minas Gerais e Espírito Santo e a oeste com os estados do Pará, Tocantins e Goiás.

O Nordeste possui importantes bacias hidrográficas, dentre as quais podemos destacar a Bacia do São Francisco. É a principal da região, formada pelos rios São Francisco e seus afluentes. São praticadas atividades de pesca, navegação e produção de energia elétrica pelas hidrelétricas de Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Paulo Afonso, Apolonio Sales e Xingó, delimita as divisas naturais de Bahia com Pernambuco e também de Sergipe e Alagoas, que é onde está localizada sua foz.

O Estado de Pernambuco é uma das unidades da Federação brasileira localizada na região Nordeste, ocupa uma área de 98.146 km<sup>2</sup>. Esse espaço geográfico abrange diversas paisagens, constituídas a partir da interação entre os elementos naturais, sendo que os principais são: relevo, clima, vegetação e hidrografia.

O relevo do estado é formado basicamente por três tipos: planície costeira, planalto e depressão. Grande parte do território estadual, cerca de 76%, possui um relevo relativamente plano, não ultrapassa os 600 metros de altitude. As planícies se encontram em áreas próximas ao litoral. À medida que se afasta do litoral a altitude aumenta, pode atingir até 1.200 metros.

Em Pernambuco são identificadas duas características climáticas: o clima tropical e o semiárido. O clima tropical ocorre nas áreas litorâneas denominadas de zona da mata. A temperatura é elevada, a média anual é de 24°C. Quanto aos índices pluviométricos, a média anual é de 1.500 mm. Nas áreas que predominam o clima semiárido as temperaturas são elevadas em boa parte do ano (cerca de 26°) e a quantidade de chuva é reduzida, algo em torno de 600 mm ao ano.

A hidrografia pernambucana é formada por vários rios, mas, sem dúvida, o principal é o São Francisco, uma vez

que o mesmo é fundamental para a irrigação e demais atividades do sertanejo nordestino. Existem ainda os rios: Capibaribe, Ipojuca, Una, Pajeú e Jaboatão.

O regime de ventos da região Nordeste do Brasil está relacionado ao movimento latitudinal do Centro de Alta Pressão do Atlântico Sul. Segundo LIRA (1987), o sistema de circulação costeira no litoral de Pernambuco é regulado pela direção e pela intensidade dos ventos.

Quanto à sazonalidade dos ventos, todo o Nordeste apresenta ventos máximos no segundo semestre (inverno e primavera).

Utilizaram-se as vazões afluentes médias mensais da série histórica de 74 anos (1931 a 2010) do posto hidrológico da usina hidrelétrica de Sobradinho, em ONS (2011). Verifica-se uma das grandes dificuldades nas séries de vazões, que é a presença da sazonalidade devido aos períodos de cheia e seca do ano, isto acontece devido a grande variabilidade existente no período úmido, correspondente de novembro a abril, conforme Figura 2 e 3.

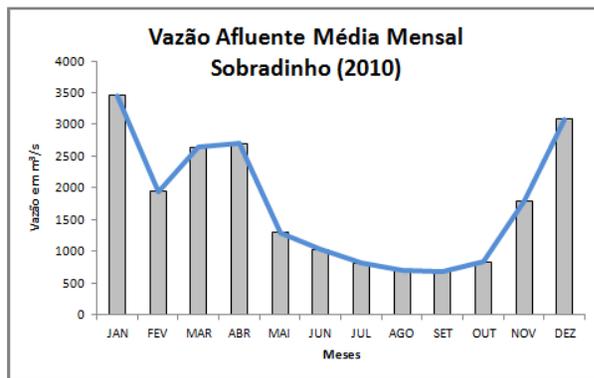


Figura 2 – Vazão Afluente de Sobradinho em m<sup>3</sup>/s, 2010, período seco.

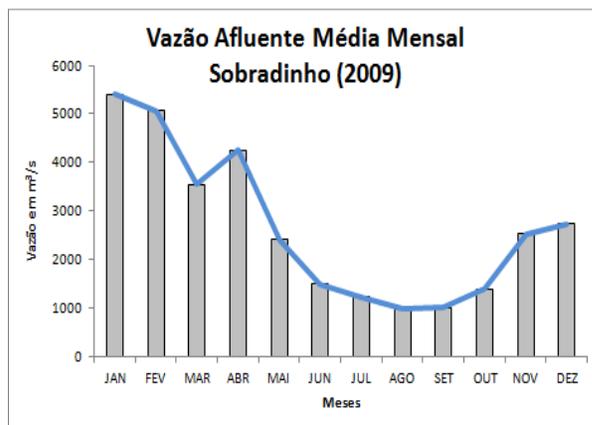


Figura 3 – Vazão Afluente de Sobradinho m<sup>3</sup>/s, 2009, período de cheia.

Utilizaram-se as velocidades médias mensais do período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010 medidos à 10 metros de altura de 9 (nove) estações anemométricas em municípios do Estado de Pernambuco na região Nordeste do Brasil, juntamente com a curva de potência do aerogerador da ENERCON E-92 2.3 MW, conforme a Figura 1. As torres foram hipoteticamente instaladas com 85, 98 e 120 metros de altura, que serviu de base para a concepção das fazendas eólicas hipotética, num arranjo com 456 aerogeradores instalados nas estações anemométricas potência instalada de 1050 MW equivalente à potência instalada na Usina Hidrelétrica de Sobradinho.

A Tabela 2 e 3 mostram a velocidade média mensal em m/s a 85,98 e 120 metros de altura e altitude, de cada estação anemométrica, no ano de 2009 e 2010:

Estação	V <sub>85</sub>	V <sub>98</sub>	V <sub>120</sub>	Altitude (m)
Arcoverde	6,35	6,63	7,04	680,70
Cabrobó	7,13	7,74	7,90	341,46
Garanhuns	5,95	6,21	6,60	822,76
Ouricuri	5,48	5,72	6,08	459,28
Pesqueira	5,24	5,47	5,81	639,00
Petrolina	5,12	5,34	5,67	370,46
Recife	3,82	3,98	4,23	10,00
Surubim	6,52	6,81	7,24	418,32
Triunfo	7,95	8,30	8,82	1105,00

Tabela 2 – Velocidade Média Mensal para 85, 98 e 120 metros de altura.

Estação	V <sub>85</sub>	V <sub>98</sub>	V <sub>120</sub>	Altitude (m)
Arcoverde	6,48	6,76	7,04	680,70
Cabrobó	6,78	7,07	7,52	341,46
Garanhuns	5,75	6,00	6,37	822,76
Ouricuri	5,50	5,73	6,09	459,28
Pesqueira	4,48	5,09	5,41	639,00
Petrolina	5,51	5,75	6,11	370,46
Recife	3,97	4,15	4,41	10,00
Surubim	6,76	7,06	7,50	418,32
Triunfo	8,68	9,06	9,62	1105,00

Tabela 3 – Velocidade Média Mensal para 85, 98 e 120 metros de altura.

Os valores dos parâmetros k e c da distribuição de Weibull foram obtidos mensalmente da Eq. (5), (6) e (7) (satisfeitas às condições citadas sobre variabilidade que em foi em média menor que 0,1) e Eq. (8), respectivamente, e para a simulação da produtividade eólica anual se converteu através da Eq. (9) a velocidade média mensal do vento com coeficiente de rugosidade de 0,30 (Pequenas

idades com poucas árvores e arbustos) para as nove localidades na altura de 85, 98 e 120 metros de altura, massa específica do ar local de  $1,078 \text{ kg/m}^3$  e massa específica do ar padrão de  $1,235 \text{ kg/m}^3$ , a energia eólica.

A Figura 3, 4 e 5 mostram a curva da média mensal da velocidade do vento de todas as estações anemométrica para o ano de 2009, a 85, 98 e 120 metros de altura.

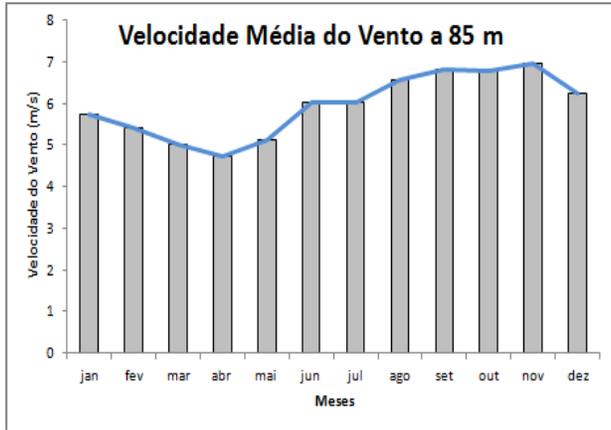


Figura 3 - Média Mensal da Velocidade do Vento das Estações Estudadas.

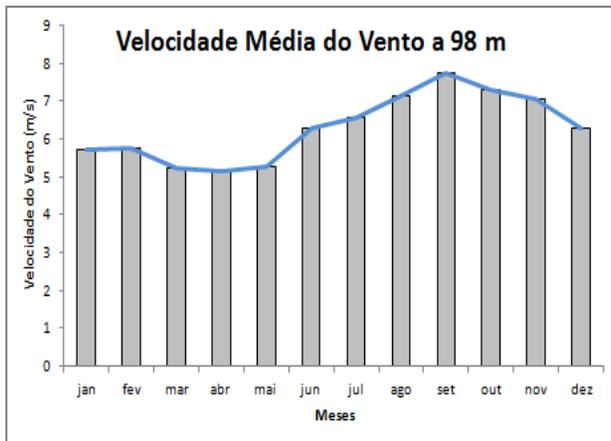


Figura 4 - Média Mensal da Velocidade do Vento das Estações Estudadas.

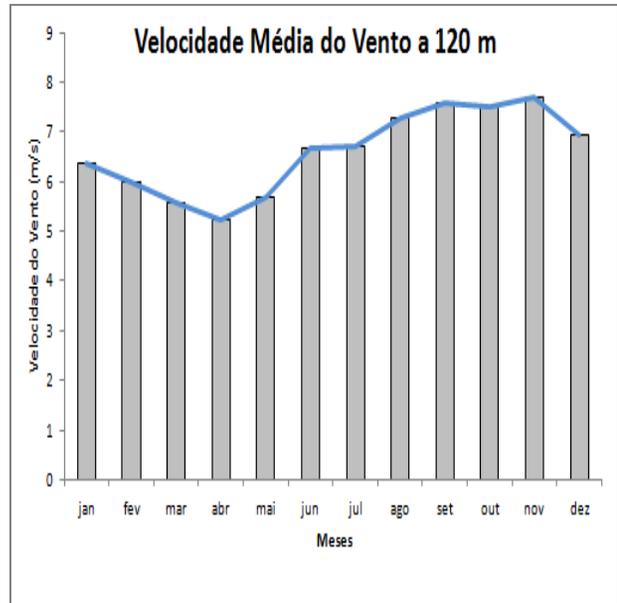


Figura 4 - Média Mensal da Velocidade do Vento das Estações Estudadas.

A Figura 6, 7 e 8 mostram a curva da média mensal da velocidade do vento de todas as estações anemométrica para o ano de 2010, a 85, 98 e 120 metros de altura.

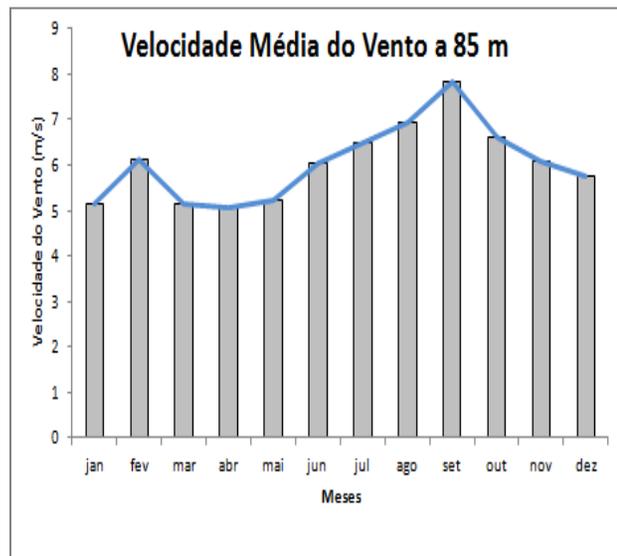


Figura 6 - Média Mensal da Velocidade do Vento das Estações Estudadas.

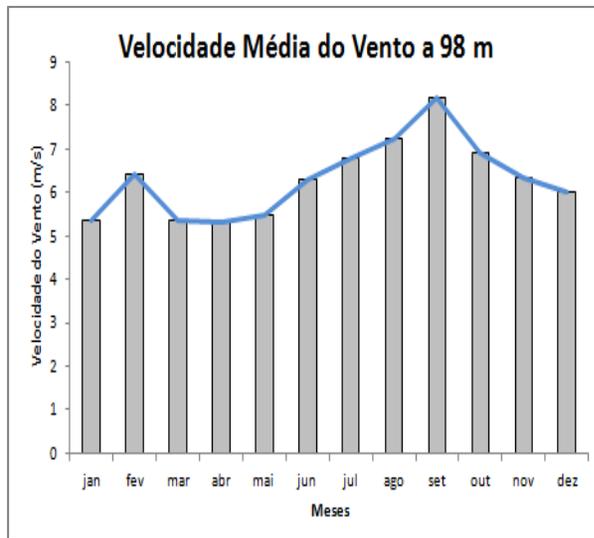


Figura 7 - Média Mensal da Velocidade do Vento das Estações Estudadas.

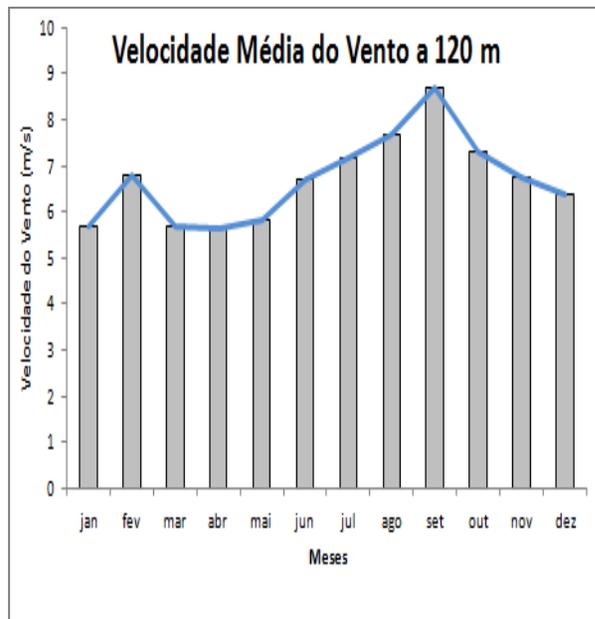


Figura 8 - Média Mensal da Velocidade do Vento das Estações Estudadas.

### 4 Resultados e Discussão

As Tabelas a seguir mostram os resultados obtidos pelos cálculos energéticos para cada altura no ano de 2009, em um período de cheia, ver vazão afluente Figura 2.

Meses / Parques a 85 m	Triunfo	Surubim	Recife	Petrolina	Pesqueira	Cabrobó	Ouricuri	Arcoverde	Garanhuns	Média (MW médio)
JAN	310,576	254,558	154,768	169,901	140,336	310,576	219,096	140,336	185,696	209,538
FEV	254,558	310,576	69,714	101,516	169,901	202,111	169,901	272,917	113,688	184,987
MAR	310,576	219,096	60,680	90,128	169,901	185,696	79,528	169,901	113,688	155,466
ABR	254,558	272,917	14,016	90,128	154,768	113,688	113,688	154,768	79,528	138,673
MAI	407,201	154,768	14,016	185,696	113,688	236,597	169,901	185,696	79,528	171,899
JUN	618,717	219,096	44,889	185,696	140,336	310,576	310,576	236,597	126,634	243,680
JUL	633,634	202,111	44,889	219,096	154,768	464,435	219,096	219,096	79,528	248,517
AGO	661,963	272,917	90,128	272,917	154,768	554,261	291,611	202,111	113,688	290,485
SET	464,435	310,576	101,516	202,111	185,696	571,065	202,111	329,746	464,435	314,632
OUT	349,057	387,846	101,516	126,634	185,696	387,846	140,336	445,548	673,368	311,094
NOV	329,746	464,435	154,768	140,336	202,111	426,454	202,111	519,402	501,403	326,752
DEZ	407,201	310,576	113,688	113,688	202,111	349,057	140,336	329,746	387,846	261,583
Média Anual (MW médio)	416,882	281,623	80,382	158,154	164,607	342,697	188,191	267,155	243,419	

Tabela 4 – Cálculos Energéticos para Parques que Torres de 85 metros de Altura, no ano de 2009, período de cheia.

Meses / Parques a 98 m	Triunfo	Surubim	Recife	Petrolina	Pesqueira	Cabrobó	Ouricuri	Arcoverde	Garanhuns	Média
JAN	340,746	281,094	172,661	189,278	156,758	340,746	242,874	156,758	206,558	231,941
FEV	281,094	340,746	78,252	113,729	189,278	224,444	189,278	300,743	127,260	204,978
MAR	340,746	242,874	68,112	101,041	189,278	206,558	89,207	189,278	127,260	172,706
ABR	281,094	300,743	15,676	101,041	172,661	127,260	127,260	172,661	89,207	154,178
MAI	441,524	172,661	15,676	206,558	127,260	261,781	189,278	206,558	89,207	190,056
JUN	652,443	242,874	30,395	206,558	156,758	340,746	340,746	261,781	141,612	265,990
JUL	666,786	224,444	30,395	242,874	172,661	499,934	242,874	242,874	89,207	270,228
AGO	693,816	300,743	101,041	300,743	172,661	599,630	320,651	224,444	127,260	314,554
SET	499,934	340,746	113,729	224,444	206,558	606,134	224,444	360,954	499,934	341,875
OUT	381,204	421,553	113,729	141,612	206,558	421,553	156,758	480,766	706,509	336,693
NOV	360,954	499,934	172,661	156,758	224,444	461,279	224,444	555,114	537,145	354,748
DEZ	441,524	340,746	127,260	127,260	224,444	381,204	156,758	360,954	421,553	286,856
Média Anual (MW médio)	448,489	309,096	89,964	175,991	183,276	371,772	208,714	292,740	263,859	

Tabela 5 – Cálculos Energéticos para Parques que Torres de 98 metros de Altura, no ano de 2009, período de cheia.

Meses / Parques a 120 m	Triunfo	Surubim	Recife	Petrolina	Pesqueira	Cabrobó	Ouricuri	Arcoverde	Garanhuns	Média
JAN	386,367	321,996	201,156	219,990	183,027	386,367	279,962	183,027	239,456	266,816
FEV	321,996	386,367	92,118	133,485	219,990	259,474	219,990	343,364	149,139	236,214
MAR	386,367	279,962	80,253	118,747	219,990	239,456	104,952	219,990	149,139	199,873
ABR	321,996	343,364	18,402	118,747	201,156	149,139	149,139	201,156	104,952	178,672
MAI	491,701	201,156	18,402	239,456	149,139	380,832	219,990	239,456	104,952	218,343
JUN	697,937	279,962	59,415	239,456	183,027	386,367	386,367	380,832	165,669	299,802
JUL	711,222	259,474	59,415	279,962	201,156	550,775	279,962	279,962	104,952	302,987
AGO	735,978	343,364	118,747	343,364	201,156	638,601	364,820	259,474	149,139	350,519
SET	550,775	386,367	133,485	259,474	239,456	654,569	259,474	407,834	550,775	382,445
OUT	429,171	471,169	133,485	165,669	239,456	471,169	183,027	551,559	747,472	374,685
NOV	407,834	550,775	201,156	183,027	259,474	511,844	259,474	605,225	507,640	396,272
DEZ	491,701	386,367	149,139	149,139	259,474	429,171	183,027	407,834	471,169	325,224
Média Anual (MW médio)	494,420	350,860	105,431	204,210	213,042	414,797	240,851	331,642	293,704	

Tabela 6 – Cálculos Energéticos para Parques que Torres de 120 metros de Altura, no ano de 2009, período de cheia.

As Tabelas a seguir mostram os resultados obtidos pelos cálculos energéticos para cada altura no ano de 2010, em um período de seca, ver vazão afluente Figura 1.

Meses / Parques a 85 m	Triunfo	Surubim	Recife	Petrolina	Pesqueira	Cabrobó	Ouricuri	Arcoverde	Garanhuns	Média (MW médio)
JAN	272,917	169,901	32,410	140,336	154,768	254,558	79,528	236,597	113,688	163,856
FEV	368,444	368,444	79,528	154,768	140,336	483,068	169,901	140,336	368,444	252,385
MAR	272,917	254,558	60,680	140,336	140,336	185,696	90,128	140,336	169,901	161,654
ABR	445,548	202,111	32,410	169,901	101,516	113,688	113,688	101,516	154,768	161,683
MAI	445,548	254,558	30,094	169,901	113,688	113,688	113,688	254,558	101,516	178,360
JUN	688,267	236,597	44,889	202,111	101,516	236,597	236,597	349,057	113,688	245,480
JUL	700,662	236,597	60,680	236,597	126,634	349,057	349,057	291,611	185,696	281,844
AGO	764,799	368,444	79,528	291,611	126,634	368,444	368,444	349,057	154,768	319,081
SET	734,875	407,201	154,768	310,576	154,768	734,875	387,846	407,201	291,611	398,191
OUT	501,403	387,846	126,634	185,696	169,901	501,403	185,696	329,746	254,558	293,654
NOV	219,096	407,201	140,336	154,768	154,768	169,901	169,901	445,548	329,746	243,474
DEZ	272,917	368,444	113,688	113,688	154,768	169,901	90,128	329,746	329,746	215,892
Média Anual (MW médio)	473,949	305,159	83,637	189,191	136,636	306,740	196,217	281,276	214,011	

Tabela 7 – Cálculos Energéticos para Parques que Torres de 85 metros de Altura, no ano de 2010, período de seca.

Meses / Parques a 85 m	Trinão	Surubim	Recife	Petrolina	Pesqueira	Cabrobó	Ouiricuri	Arcoverde	Garanhuns	Média (MW médio)
JAN	300,743	189,278	58,839	156,758	172,661	281,094	89,207	261,781	127,260	181,958
FEV	401,425	401,425	89,207	172,661	156,758	518,740	189,278	156,758	401,425	276,409
MAR	300,743	281,094	68,112	156,758	156,758	206,558	101,041	156,758	189,278	179,678
ABR	480,766	224,444	58,839	189,278	113,729	127,260	127,260	113,729	172,661	178,663
MAI	480,766	281,094	42,761	189,278	127,260	127,260	281,094	113,729	196,722	
JUN	718,660	261,781	50,395	224,444	113,729	261,781	261,781	381,204	127,260	266,782
JUL	730,279	261,781	68,112	261,781	141,612	381,204	381,204	320,651	206,558	305,909
AGO	789,386	401,425	89,207	320,651	141,612	401,425	401,425	381,204	172,661	344,333
SET	762,034	441,524	172,661	340,746	172,661	762,034	421,553	441,524	320,651	426,154
OUT	537,145	421,553	141,612	206,558	189,278	537,145	206,558	360,954	281,094	320,211
NOV	242,874	441,524	156,758	172,661	172,661	189,278	189,278	480,766	360,954	267,417
DEZ	300,743	401,425	127,260	172,661	189,278	101,041	360,954	360,954	237,953	
Média Anual (MW médio)	503,797	334,029	93,647	209,903	152,615	331,921	216,407	308,115	236,207	

Tabela 8 – Cálculos Energéticos para Parques que Torres de 98 metros de Altura, no ano de 2010, período de seca.

Meses / Parques a 120 m	Trinão	Surubim	Recife	Petrolina	Pesqueira	Cabrobó	Ouiricuri	Arcoverde	Garanhuns	Média (MW médio)
JAN	243,364	219,990	69,356	183,027	201,156	321,996	104,952	300,832	149,139	210,423
FEV	450,305	450,305	104,952	201,156	183,027	569,482	219,990	183,027	450,305	312,505
MAR	343,364	321,996	80,253	183,027	183,027	239,456	118,747	183,027	219,990	208,099
ABR	531,550	259,474	69,356	219,990	133,485	149,139	149,139	133,485	201,156	205,197
MAI	531,550	321,996	50,414	219,990	149,139	149,139	149,139	321,996	133,485	225,205
JUN	758,394	300,832	59,415	259,474	133,485	300,832	300,832	429,171	149,139	299,064
JUL	768,758	300,832	80,253	300,832	165,669	429,171	429,171	364,850	239,456	342,110
AGO	820,053	450,305	104,952	364,850	165,669	450,305	450,305	429,171	201,156	381,863
SET	796,652	491,701	201,156	386,367	201,156	796,652	471,169	491,701	364,850	466,823
OUT	587,640	471,169	165,669	239,456	219,990	587,640	239,456	407,834	321,996	360,094
NOV	279,982	491,701	183,027	201,156	219,990	219,990	219,990	531,550	407,834	304,041
DEZ	343,364	450,305	149,139	149,139	201,156	219,990	118,747	407,834	407,834	271,945
Média Anual (MW médio)	546,246	377,550	109,828	242,372	178,176	369,483	247,636	348,706	270,528	

Tabela 9 – Cálculos Energéticos para Parques que Torres de 120 metros de Altura, no ano de 2010, período de seca.

A partir destes resultados da geração eólica dos parques hipotéticos, obtidos por métodos aqui citados, e de posse das vazões mensais naturais do posto hidrológico da Usina de Sobradinho, especificamente para o ano de 2009 (cheia) e 2010 (seca) que foram períodos em que há variação significativa no período de 2005 a 2012, ou seja, o período de 2009 houve a maior cheia e 2010 o período de maior seca, e juntamente baseado na informação de PORTO et al. (2002) a produtividade na cascata do São Francisco onde cada 100 MW médios produzidos de fonte eólica proporcionaria uma economia de água da ordem de 40 m<sup>3</sup>/s, foram obtidos os seguintes resultados, referentes a economia na vazão afluente média como mostram as Tabelas:

ECONOMIA EM m <sup>3</sup> /s PARA GERAÇÃO EÓLICA A 85 m de ALTURA			
Meses	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Sobradinho	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Economizada	Perc(%)
JAN	5409	84	1,55
FEV	5072	74	1,46
MAR	3542	62	1,76
ABR	4254	55	1,30
MAI	2410	69	2,85
JUN	1492	97	6,53
JUL	1236	99	8,04
AGO	976	116	11,90
SET	1019	126	12,35
OUT	1393	124	8,93
NOV	2534	131	5,16
DEZ	2730	105	3,83
	<b>Média =2672</b>	<b>Soma = 1143</b>	<b>Média =5,47</b>

Tabela 10 - Vazão Economizada no Período de Cheia (2009).

ECONOMIA EM m <sup>3</sup> /s PARA GERAÇÃO EÓLICA A 98 m de ALTURA			
Meses	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Sobradinho	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Economizada	Perc(%)
JAN	5409	93	1,72
FEV	5072	82	1,62
MAR	3542	69	1,95
ABR	4254	62	1,45
MAI	2410	76	3,15
JUN	1492	106	7,13
JUL	1236	108	8,74
AGO	976	126	12,89
SET	1019	137	13,42
OUT	1393	135	9,67
NOV	2534	142	5,60
DEZ	2730	115	4,20
	<b>Média =2672</b>	<b>Soma = 1250</b>	<b>Média = 5,96</b>

Tabela 11 - Vazão Economizada no Período de Cheia (2009).

ECONOMIA EM m <sup>3</sup> /s PARA GERAÇÃO EÓLICA A 120 m de ALTURA			
Meses	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Sobradinho	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Economizada	Perc(%)
JAN	5409	107	1,97
FEV	5072	94	1,86
MAR	3542	80	2,26
ABR	4254	71	1,68
MAI	2410	87	3,62
JUN	1492	120	8,04
JUL	1236	121	9,80
AGO	976	140	14,36
SET	1019	153	15,01
OUT	1393	150	10,76
NOV	2534	159	6,25
DEZ	2730	130	4,76
	<b>Média =2672</b>	<b>Soma =1413</b>	<b>Média =6,70</b>

Tabela 12 - Vazão Economizada no Período de Cheia (2009).

ECONOMIA EM m <sup>3</sup> /s PARA GERAÇÃO EÓLICA A 85 m de ALTURA			
Meses	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Sobradinho	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Economizada	Perc(%)
JAN	3459	66	1,89
FEV	1939	101	5,21
MAR	2642	65	2,45
ABR	2701	65	2,39
MAI	1289	71	5,54
JUN	1025	98	9,58
JUL	815	113	13,83
AGO	690	128	18,49
SET	683	159	23,33
OUT	831	117	14,13
NOV	1794	97	5,43
DEZ	3086	86	2,80
	<b>Média =1746</b>	<b>Soma =1166</b>	<b>Média =8,76</b>

Tabela 13 - Vazão Economizada no Período de Seca (2010).

ECONOMIA EM m <sup>3</sup> /s PARA GERAÇÃO EÓLICA A 98 m de ALTURA			
Meses	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Sobradinho	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Economizada	Perc(%)
JAN	3459	73	2,10
FEV	1939	111	5,70
MAR	2642	72	2,72
ABR	2701	71	2,65
MAI	1289	79	6,11
JUN	1025	107	10,41
JUL	815	122	15,01
AGO	690	138	19,96
SET	683	170	24,97
OUT	831	128	15,41
NOV	1794	107	5,96
DEZ	3086	95	3,08
	<b>Média =1746</b>	<b>Soma =1273</b>	<b>Média =9,51</b>

Tabela 14 - Vazão Economizada no Período de Seca (2010).

ECONOMIA EM m <sup>3</sup> /s PARA GERAÇÃO EÓLICA A 120 m de ALTURA			
Meses	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Sobradinho	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s) Economizada	Perc(%)
JAN	3459	84	2,43
FEV	1939	125	6,45
MAR	2642	83	3,15
ABR	2701	82	3,04
MAI	1289	90	6,99
JUN	1025	120	11,67
JUL	815	137	16,79
AGO	690	153	22,13
SET	683	187	27,35
OUT	831	144	17,33
NOV	1794	122	6,78
DEZ	3086	109	3,53
	<b>Média =1746</b>	<b>Soma =1435</b>	<b>Média =10,64</b>

Tabela 15 - Vazão Economizada no Período de Seca (2010).

Realizou-se um comparativo com dois períodos, cheia e seca, no intuito de demonstrar a eficiência da energia eólica nos dois períodos, comparando com a vazão afluyente da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Comprovou-se, hipoteticamente, que a geração de energia eólica simulada nas três alturas (85, 98 e 120) tiveram praticamente os mesmos resultados, concluindo a significativa importância para o setor elétrico o estudo da complementaridade hidro-eólica, mesmo em períodos inversos (seca e chuva).

Neste comparativo com um período de cheia e com um período de seca dos rios, mostrando que há uma variação significativa do período de cheia para um período de seca, na energia eólica gerada, ambos os comparativos são feitos com a vazão afluyente da Usina Hidrelétrica de Sobradinho. Comprovou-se neste estudo hipotético que a variação de energia eólica gerada é mínima, pois a geração eólica no período de seca foi de aproximadamente 269 MWh/h e no período de cheia foi de 264 MWh/h. As simulações realizadas com a potência hipotética instalada de 1050 MW alocadas em 9 (nove) municípios do Estado de Pernambuco na região Nordeste do Brasil, proporcionaram uma contribuição anual de produção eólica na ordem de 29,06 GWh/ano média no período seco e de 28,54 GWh/ano média no período de cheia, com 456 aerogeradores de 2.300 kW média distribuídos pelas fazendas eólicas a 85, 98 e 120 metros de altura.

O fator de capacidade mede o desempenho de uma usina eólica no aspecto energético. Defini-se como a relação entre a potência média a potência máxima de uma usina. As usinas de base têm usualmente fatores de capacidade elevados, enquanto as de ponta apresentam fatores de capacidade mais baixos. Os valores obtidos para as simulações foram superiores ao valor típico esperado para as turbinas eólicas modernas (0,30).

A utilização anual da potência instalada, em horas, é calculada pela divisão da energia produzida pela potência nominal. Os valores em ficaram em média de 1000 a 3600 horas.

Nota-se que a regularização da vazão do rio São Francisco pode receber uma grande colaboração de forma natural do aproveitamento eólico, principalmente no período seco que é o segundo semestre do ano, onde o maior potencial acontece por grande influência dos ventos alísios.

A Figura 9 e 10 apresentam uma comparação das vazões naturais afluentes no rio São Francisco com a média mensal da geração eólica de energia esperada nas estações anemométricas instaladas no Nordeste. Observa-se que o elevado potencial eólico da região Nordeste pode-se induzir que a contribuição da energia eólica a estabilização

sazonal da oferta de energia elétrica pode advir de vários Estados da região, principalmente no segundo semestre do ano, período em que o potencial eólico na região é mais elevado e registram-se as menores vazões no rio São Francisco.

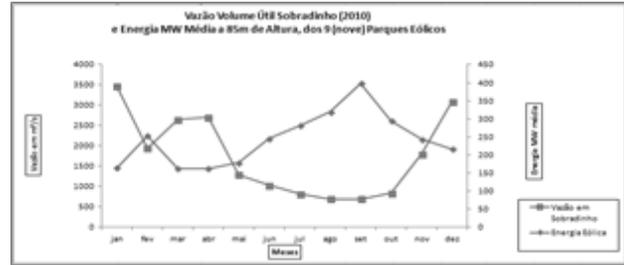


Figura 9 – Comparação das Vazões Afluentes de Sobradinho com a Média Mensal da Geração Eólica em um período de seca (2010)

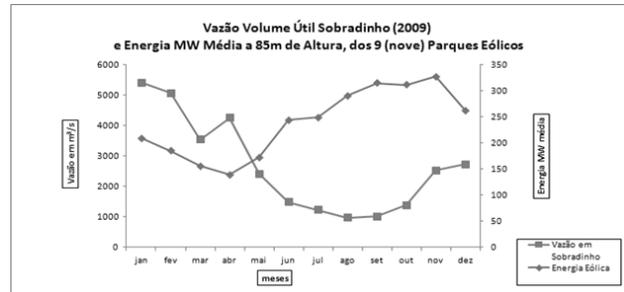


Figura 10 – Comparação das Vazões Afluentes de Sobradinho com a Média Mensal da Geração Eólica em um período de cheia (2009).

Observa-se na Figura 1 que o elevado potencial eólico da região Nordeste do Brasil pode-se induzir que a contribuição da energia eólica a estabilização sazonal da oferta de energia elétrica pode advir de vários municípios da região, principalmente no segundo semestre do ano, período em que o potencial eólico na região é mais elevado e registram-se as menores vazões no rio São Francisco.

A comprovação da existência de uma grande complementaridade sazonal entre os regimes hidráulicos das principais bacias e o regime eólico, como apresentado na Figura 9 em um período de seca, imputa significativos benefícios ao sistema interligado nacional, indicando ser possível adicionar maiores volumes de energia ao sistema exatamente nos períodos secos.

Observa-se também que na Figura 10, quando ocorre o período de cheia e baseado nos resultados obtidos pelos cálculos, percebe-se que há uma variação pequena e significativa entre períodos de seca e períodos de cheia, mostrando que o aproveitamento da energia eólica pode ser feito tanto em um período de seca como em um período de cheia, de forma benéfica, visto que o período de seca

obteve ligeiramente melhor desempenho em todas as alturas simuladas, comparado à produtividade do período de cheia. Cabendo ao Governo criar as condições de desenvolvimento da política energética do país.

## 5 Conclusão

O estudo hipotético provou que a regularização da vazão do rio São Francisco, mais precisamente na barragem de Sobradinho, pode receber grandes quantidades de energia elétrica de forma eólica, evitando que se tenha que utilizar a água do rio São Francisco, inclusive no segundo semestre do ano, em que ocorrem as menores vazões afluentes e onde ocorre o maior potencial de energia por grande influência dos ventos alísios. Salientando-se que a usina hidrelétrica de Sobradinho é sujeita à múltiplos usos e todo este estudo inicial teve referencia mensal, cabendo futuramente uma análise semanal ou diário para se verificar a real viabilidade operativa desse parque eólico.

Finalmente, as informações geradas servem como importante ferramenta no planejamento e nas tomadas de decisões de empresas, órgãos gestores e do próprio Governo. Entre as principais áreas beneficiadas estão: a agricultura, recursos hídricos, estudos científicos, geração de energia, defesa civil, transportes, saúde, turismo, lazer, etc.

## Referências

- [1] ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, (2011). Relatório de Vazões Afluentes Médias Mensais nos Aproveitamentos Hidrelétricos, período de 1931 a 2010.
- [2] CAMARGO, ARILDE SUTIL GABRIEL DE (2005) “Análise da operação das usinas eólicas de Camelinho e Palmas e avaliação do potencial eólico de localidades no Paraná”. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) . Curitiba: CEFET-PR,.
- [3] SILVA, NEILTON FIDELIS (2006 ) “Fontes de Energia Renováveis Complementares na Expansão do Setor Elétrico Brasileiro: O Caso da Energia Eólica “ [Rio de Janeiro] 2006 VIII, 263 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Planejamento Energético.
- [4] BERNARDO B. DA SILVA, JAKSON J. A. ALVES, ENILSON P. CAVALCANTI & RENILSON T. DANTAS “Potencial eólico na direção predominante do vento no Nordeste brasileiro”, Universidade Federal de Campina Grande, 2002.
- [5] MARINHO, MANOEL HENRIQUE DA NÓBREGA “OFERTA DE ENERGIA ATRAVÉS DA COMPLEMENTARIDADE SAZONAL HIDRO-EÓLICA NO ESTADO DE PERNAMBUCO”, Universidade de Pernambuco.
- [6] MARINHO, M. H. N (2010) “Previsão de Afluências Utilizando Redes Neurais para Complementaridade Hidro-Eólica Visando a Oferta de Energia Elétrica”, Departamento de Engenharia Elétrica e Sistemas de Potência (DEESP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).
- [7] SALLES, ANA CLAUDIA NIOAC DE (2004) “Metodologias de Análise de Risco para Avaliação Financeira de Projetos de Geração Eólica” ,Tese de Mestrado. [Rio de Janeiro] 2004 X, 83 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Planejamento Energético, 2004).
- [8] SILVA, GUSTAVO RODRIGUES (2003) “CARACTERÍSTICAS DE VENTO DA REGIÃO NORDESTE Análise, Modelagem e Aplicações para Projetos de Centrais Eólicas”, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco
- [9] ESTEVES , TERESA MARIA VELOSO NUNES SIMÕES (2004) “BASE DE DADOS DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO VENTO EM PORTUGAL – METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO”, Tese de Mestrado.Universidade de Lisboa.