

## **ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DESCRIÇÃO DO REGIME EÓLICO E SUAS APLICAÇÕES**

**Luís Roberto Almeida Gabriel Filho**<sup>1</sup>

**Juliano Aparecido Véri**<sup>2</sup>

**Daniel dos Santos Viais Neto**<sup>3</sup>

**Camila Pires Cremasco Gabriel**<sup>4</sup>

**Odivaldo José Seraphim**<sup>5</sup>

**RESUMO:** A energia dos ventos é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em quase todos os lugares. A geração da eletricidade através de fontes alternativas de energia como a eólica e a solar ganha grande importância diante da situação mundial em relação à preservação do meio ambiente e da necessidade de depender menos dos combustíveis fósseis como fontes de energia. No Brasil, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território

---

<sup>1</sup> Licenciado em Matemática (FCT/UNESP), Mestre em Matemática Pura (ICMC/USP), Doutor em Agronomia/Energia na Agricultura (FCA/UNESP) e Pós-doutorando em Agronomia/Energia na Agricultura (FCA/UNESP), Professor Assistente Doutor da CET/UNESP – Tupã/SP. gabrielfilho@tupa.unesp.br.

<sup>2</sup> Licenciado em Matemática (FACLEPP/UNOESTE) e Mestrando em Agronomia/Irrigação e Drenagem (FCA/UNESP).

<sup>3</sup> Licenciado e Bacharel em Matemática (ICMC/USP), Mestre em Matemática Pura (ICMC/USP) e Doutorando em Agronomia/Irrigação e Drenagem (FCA/UNESP), Professor Associado da FATEC – Presidente Prudente. dvneto@fatecpp.edu.br.

<sup>4</sup> Licenciada em Matemática (FCT/UNESP), Mestre em Matemática Pura (DM/UFSCar), Doutora em Agronomia/Energia na Agricultura (FCA/UNESP) e Pós-doutoranda em Bioestatística (IB/UNESP), Professora Assistente da FATEC – Presidente Prudente. camila@fatecpp.edu.br.

<sup>5</sup> Engenheiro Elétrico, Mestre em Agronomia/Energia na Agricultura (FCA/UNESP), Doutor em Agronomia/Energia na Agricultura (FCA/UNESP) e Livre Docente em Energização Rural(FCA/UNESP), Professor Assistente Adjunto (FCA/UNESP). seraphim@fca.unesp.br.

nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado. Para tanto se faz necessário estudos e revisões bibliográficas dos métodos de descrição e dimensionamento do regime eólico bem como as suas aplicações. Para isso foi feita uma análise do recurso eólico disponível na Região de Botucatu, utilizando os principais métodos de análise estatística e de determinação da energia produzida por um aerogerador.

**Palavras-chave:** energia dos ventos, dimensionamento, análise estatística.

## DESCRIPTION OF METHODS OF ANALYSIS OF WIND REGIME AND ITS APPLICATIONS

**ABSTRACT:** The energy of wind is an abundant source of renewable energy, clean and available almost everywhere. The generation of electricity through alternative energy sources like wind and solar gains great importance on the world situation regarding the preservation of the environment and the necessity of relying less on fossil fuels as energy sources. In Brazil, some precise measurements of wind, held recently in various parts of the country, indicate the existence of a huge wind energy potential untapped. To do so is necessary studies and literature reviews of the methods of description and sizing of wind regime and its applications. To this was done an analysis of wind resource available in the region of Botucatu, using the main methods of statistical analysis and determination of the energy produced by a wind turbine.

**KEYWORDS:** wind energy, design, statistical analysis.

### 1. INTRODUÇÃO

A energia eólica tem sido aproveitada desde a antiguidade, sendo que mecanismos foram criados para transformar essa energia contida no vento em energia mecânica, afim de facilitar a realização de alguns trabalhos feitos por mão de obra humana. As principais

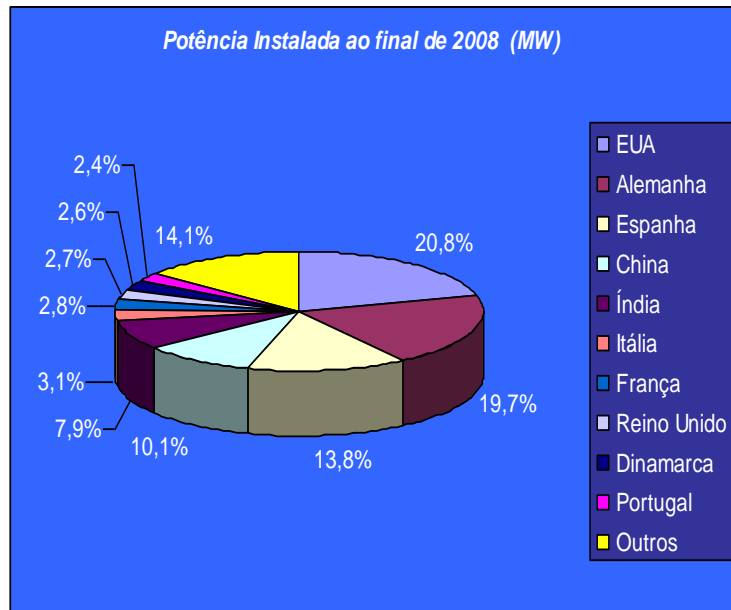
aplicações do uso da energia eólica na antiguidade era o de impulsionar os barcos através das velas e fazer funcionar a engrenagem de moinhos, ao mover as suas pás, enquanto que em moinhos, na sua grande maioria, eram usados para moagem de grãos e para bombeamento de água (Figura 1).



**Figura 1.** Principais formas de utilização da energia eólica na antiguidade.

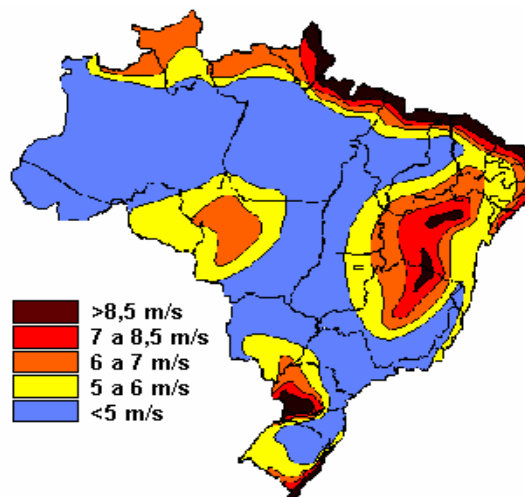
Com o choque petrolífero da década de 70 que causou uma crise energética mundial e a degradação do meio ambiente crescente, novos investimentos em pesquisa em energia eólica iniciaram, mas agora com o interesse na geração de eletricidade. Por um lado a necessidade de assegurar a diversidade e segurança no fornecimento de energia e por outro a necessidade de preservar o meio ambiente, cuja a degradação é acentuada pelo uso de combustíveis fósseis. Estes fatores fizeram com que se concluísse a necessidade da busca por energia proveniente de fontes renováveis (CASTRO, 2008).

No mundo ao todo são 121GW de potência instalada, em que a relação dos dez países que mais possuem potencia instalada é apresentada na Figura 2.



**Figura 2.** Potência instalada ao final de 2008.

No Brasil, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado, onde se pode verificar observando o Atlas Eólico Brasileiro (Figura 3).



**Figura 3.** Atlas Eólico Brasileiro (CBEE, 2008).

Estima-se que só no Nordeste, o potencial eólico é da ordem de 6 GW (CBEE, 2008). Atualmente são aproximadamente 605 MW de potência instalada, em que a maior parte está localizada nas regiões Nordeste e Sul.

No estado do Rio Grande do Sul está localizado o parque nacional de Osório (Figura 4), o maior da América Latina, com 75 aerogeradores de 2 MW de potência cada, totalizando 150 MW de potência instalada.



**Figura 4.** Parque Nacional de Osório – RS.

Também é crescente a instalação de turbinas eólicas no mar (*offshore*), apesar de sua instalação ser bem mais cara do que em terra. Isso acontece devido ao fato de o mar não ter uma superfície rugosa em que haja obstáculos que interfiram no fluxo de ar. Assim sendo, o mar apresenta uma maior disponibilidade de vento.

Um dos países pioneiros na utilização da energia eólica e em instalações deste tipo (*offshore*) é a Dinamarca, sendo que atualmente mais de 20% de sua matriz energética provém de aerogeradores (CASTRO, 2008).



**Figura 5.** Instalações na Dinamarca do tipo *offshore* (CASTRO, 2008).

As tendências da atualidade, tendo em vista a importância da construção de conhecimento na área, favorecem o desenvolvimento de estudos que venham a contribuir de forma significativa com o desenvolvimento das tecnologias na área da utilização da energia elétrica provenientes de fontes renováveis.

O objetivo deste trabalho é estruturar os métodos utilizados para uma descrição geral do comportamento eólico de uma região, visando estabelecer uma descrição do regime eólico através da função de *Weibull* e do modelo analítico da energia de uma turbina eólica, bem como mostrar as aplicações de tais métodos na região de Botucatu-SP.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1. Materiais

A velocidade e direção do vento instantâneas foram medidas com o anemômetro RM-YOUNG WIND MONITOR da CAMPBELL (Figura 6) de sensibilidade mínima 1,0 m/s a uma altura de 10 metros.



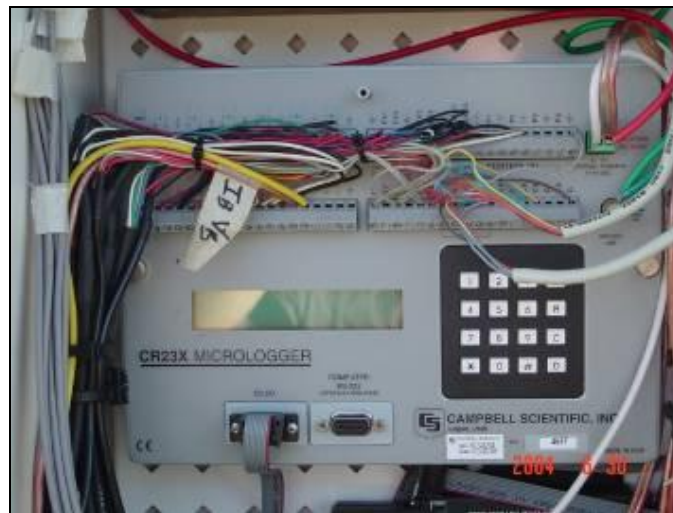
**Figura 6.** Anemômetro RM-YOUNG WIND MONITOR utilizado para determinação da velocidade e direção do vento no local.

Para a geração de energia elétrica a partir da energia eólica disponível no local, selecionou-se um aerogerador AIR-X (Figura 7) modelo rural da SOUTHWEST WINDPOWER com potência nominal de 400 W e dotado de controlador de carga interno, constituindo-se assim a geração eólica do sistema eólico fotovoltaico. O aerogerador foi montado em uma torre de aço com 14 metros de altura.



**Figura 7.** Aerogerador AIR-X com potência nominal de 400W.

Os dados coletados foram armazenados em um datalogger CR23X (Figura 8) e em um computador em tempo real por meio do uso do programa PC208W, utilizando-se da interface CSI do datalogger em conexão com a porta serial RS232 do microcomputador, por meio de um modem instalado para este fim.



**Figura 8.** Equipamento para aquisição de dados (Datalogger CR23X).

## **2.2. Métodos**

Para a elaboração da caracterização do regime eólico da região descrita, foi necessário seguir as seguintes etapas:

- Levantamento de dados feito através de anemômetros posicionados em alturas estratégicas por um longo período de tempo;
- Identificação dos obstáculos do terreno;
- Realização da análise estatística através da distribuição de frequência.

## **3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **3.1. Resultados teóricos**



### 3.1.1. Análise estatística e dimensionamento

Para a presente análise estatística do comportamento eólico, a função analítica mais adequada é a função de densidade de *Weibull*, que indica a probabilidade de a velocidade do vento em um determinado instante ser igual a um determinado valor (GABRIEL FILHO, 2007). Esta função é dada pela seguinte expressão matemática:

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

onde:

- $u$ : velocidade média do vento;
- $c$ : parâmetro de escala, com as dimensões de velocidade;
- $k$ : parâmetro de forma, adimensional.

Um dos métodos mais utilizados para calcular os parâmetros  $k$  e  $c$  envolve uma regressão linear que representa a probabilidade acumulada, ou seja, a probabilidade de uma variável aleatória  $x$  exceder o valor  $x_0$ , e dada por:

$$F(x_0) = 1 - \int_{-\infty}^{x_0} f(x) dx,$$

de que decorre a relação:

$$f(x) = -\frac{dF(x)}{dx}$$

A aplicação ao caso da distribuição de *Weibull* conduz para  $F(\bar{u})$  à expressão:

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

que pode ser expressa como uma função linear do tipo:

$$Y = AX + B,$$

em que:

$$Y = \ln[-\ln(F(\bar{u}))] \text{ e } X = \ln(\bar{u}).$$

Os parâmetros  $k$  e  $c$  estão relacionados com  $A$  e  $B$ , através de:

$$k = A \text{ e } c = \exp\left(-\frac{B}{A}\right).$$

Para se obter valores de velocidade média do vento para alturas em que não foram aferidas, pode ser feito um mapeamento local, identificando os obstáculos do terreno que caracterizam sua rugosidade e com a expressão matemática de *Prandtl* é possível corrigir de forma aproximada os dados de velocidade do vento. Esta expressão é dada por:

$$\frac{\bar{u}(z)}{\bar{u}(z_R)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)}$$

onde:

- $\bar{u}(z)$ : velocidade média do vento á altura  $z$ .
- $\bar{u}(z_R)$ : velocidade média do vento á altura de referência  $z_R$ .
- $z_0$ : comprimento característico da rugosidade do solo (obtido em valores tabelados).

### **3.1.2. Energia elétrica produtível**

A energia disponível para uma turbina eólica é a energia cinética associada a uma coluna de ar que se desloca a uma velocidade uniforme e constante.

$$E_{disp} = E_{cinética} = \frac{m \cdot u^2}{2}$$



Mas,  $m = \rho \cdot V$ , onde,  $V = A \cdot \Delta S$ . Assim, reescrevendo a expressão temos:

$$E_{disp} = \frac{\rho \cdot A \cdot \Delta S \cdot u^2}{2}$$

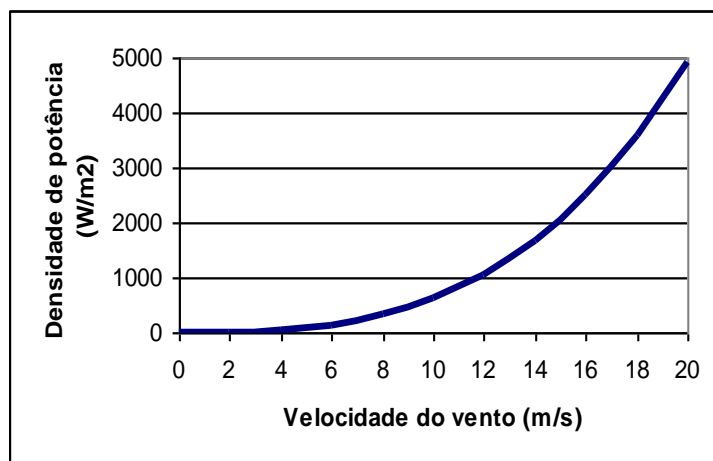
Com relação à potência eólica temos:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot u^3,$$

onde:

- $\rho$ : é a densidade do ar, com valor de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  nas condições normais de Temperatura e Pressão (CNTP);
- $A$ : é a área da secção transversal por qual passa a coluna de ar;
- $u$ : é a velocidade do vento.

A expressão indica que a potência disponível no vento é proporcional ao cubo de sua velocidade, ou seja, a potência eólica depende fortemente da velocidade do vento. A Figura 9 mostra um gráfico de densidade de potência por metro quadrado, em função da velocidade do vento.



**Figura 9.** Densidade de potência ( $\text{W/m}^2$ ).

Mas essa energia eólica não pode ser convertida integralmente em energia mecânica no veio do rotor. Existe um limite de conversão eólo – mecânica denominado limite de *Betz*, em homenagem ao físico alemão *Albert Betz* (CRESESB, 2009), que demonstrou que esta conversão tem como máximo rendimento possível o valor de 59,3% de aproveitamento da energia eólica.

O rendimento efetivo da conversão numa turbina eólica é denominado *coeficiente de potência* e depende da velocidade do vento e é dado por:

$$C_p = \frac{P_m}{P_{disp}}$$

em que  $P_m$  é a potência mecânica disponível no veio da turbina.

Outro fator que deve ser considerado na obtenção final de energia elétrica é o Rendimento de conversão eletromecânica ( $\eta$ ), tendo em vista que nem toda a energia mecânica no veio do rotor pode ser convertida em energia elétrica. Segundo TOLMASQUIM (2004), a potência elétrica teoricamente extraída pela turbina eólica pode ser descrita pela equação:

$$P_E = \frac{1}{2} \rho \cdot c_p \cdot \eta \cdot A \cdot u^3$$

onde:

- $\rho$ : massa específica do ar;
- $c_p$ : coeficiente de potência;
- $\eta$ : eficiência de conversão eletromecânica;
- $A$ : área do rotor; e
- $u$ : velocidade frontal.

Uma vez obtida uma representação do perfil de ventos fiável numa base de tempo alargada, o valor esperado para a energia elétrica produtível anualmente é, no caso geral:

$$E_a = 8760 \int_{u_0}^{u_{\max}} f(\bar{u}) P_e(\bar{u}) du$$

em que:

- $f(\bar{u})$  é a densidade de probabilidade da velocidade média do vento;
- $P_e(\bar{u})$  é a característica elétrica do sistema de conversão de energia eólica;
- $u_0$  é a velocidade de *cut-in*;
- $u_{\max}$  é a velocidade de *cut-out*;

Esta integral pode ser calculada analiticamente quando são conhecidas as expressões das funções  $f(\bar{u})$  e  $P_e(\bar{u})$ ; em alternativa pode ser calculado numericamente, usando o método de integração trapezoidal, por exemplo. Habitualmente estão disponíveis distribuições discretas, pelo que a equação anterior se transforma em:

$$E_a = \sum_{u_0}^{u_{\max}} f_r(\bar{u}) P_e(\bar{u})$$

em que  $f_r(\bar{u})$  (h) é a frequência relativa de ocorrência da velocidade média do vento:  $f_r(\bar{u}) = 8760f(\bar{u})$ .

### 3.2. Resultados Práticos

Com as aferições feitas no período de setembro de 2004 a setembro de 2005, foi possível criar uma tabela de frequência (Tabela 1), em relação à velocidade média do vento.

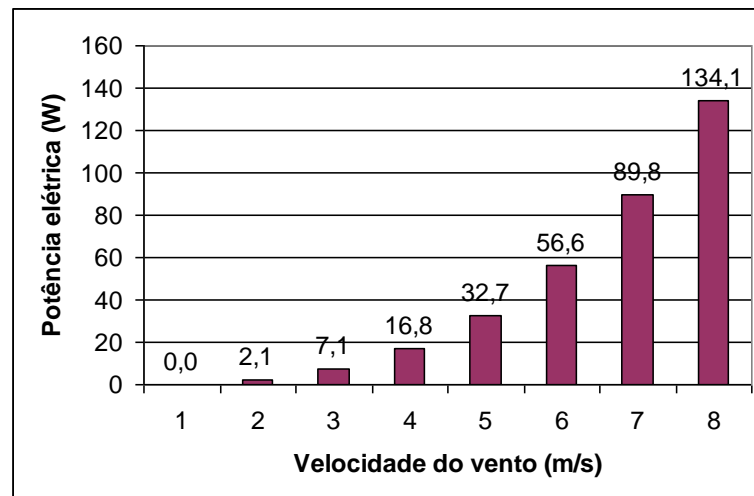
**Tabela 1.** Classes de velocidade determinadas e frequências relacionadas.

Classes de Velocidade	Velocidade Associada	Frequência Absoluta	Frequência Relativa
0  — 1	1	1468	0,168
1  — 2	2	2949	0,337
2  — 3	3	2078	0,237



3	—	4	4	1377	0,157
4	—	5	5	675	0,077
5	—	6	6	150	0,017
6	—	7	7	30	0,003
7	—	8	8	9	0,001
TOTAL			---	8736	0,997

Com os dados de frequência registrados foi possível calcular a quantidade de energia produzida pelo aerogerador nesse período. A Figura 11 mostra a potência elétrica extraída do aerogerador em cada classe de velocidade.



**Figura 11.** Potência elétrica.

A Figura 12 mostra gráfico da frequência absoluta de ocorrência da velocidade média do vento.

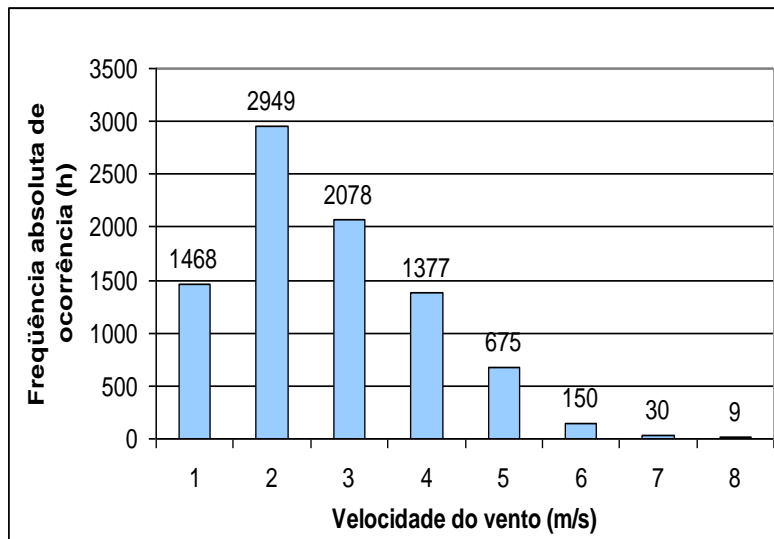


Figura 12. Frequência absoluta de ocorrência.

A energia produzida calculada durante o ano foi de 78 kWh. A Figura 13 mostra a distribuição de energia produzida por velocidade média do vento.

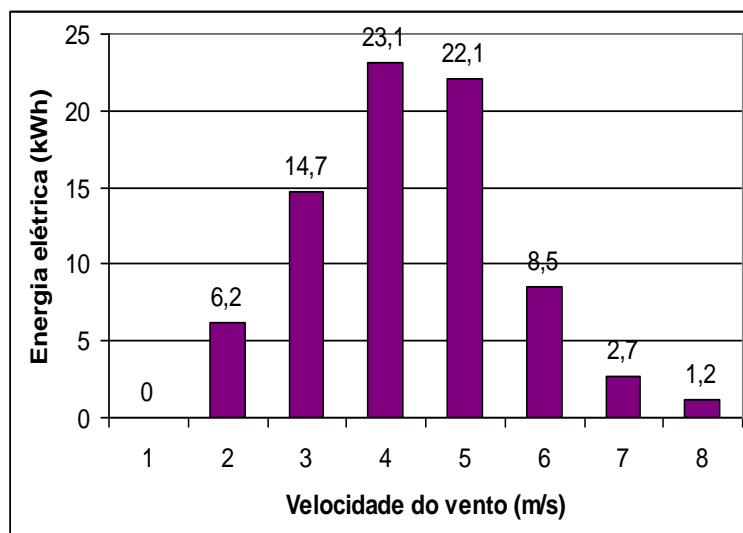


Figura 13. Distribuição de energia produzida por velocidade média do vento (kWh).

#### 4. CONCLUSÕES

Pelos métodos apresentados no presente trabalho, é possível afirmar que a descrição do comportamento eólico de uma região, baseada fundamentalmente nas aferições de velocidade do vento, pode fornecer estimativas importantes que podem auxiliar no dimensionamento da instalação de aerogeradores no local de estudo.

Além disto, a energia disponível para uma turbina eólica é outra fundamental característica que pode ser utilizada para tal dimensionamento e obtida por métodos analíticos.

Desta forma, é possível afirmar que para um estudo do regime eólico, são necessárias a determinação de curvas de potência eólica, curvas de distribuição de *Weibull* e tabelas de distribuições de freqüência da velocidade do vento. Tais métodos são necessários para um estudo de dimensionamento do local para a instalação de turbinas eólicas ou até para a criação de parques eólicos.

Para a região de Botucatu-SP, o dimensionamento calculado de 78 kWh de energia anual produzida pelo aerogerador AIR-X, representa um potencial relativamente baixo para a sustentabilidade de, por exemplo, uma casa de pequeno porte, visto que tal valor é em geral equivalente ao gasto mensal. Por outro lado, esta energia possivelmente poderia ser aplicada como base de iluminação no local, fornecimento de energia para cercas elétricas ou até de irrigação de hortaliças.

#### 5. REFERÊNCIAS

CASTRO, R. M. G. i Série: Energias renováveis e produção descentralizada. Portugal: IST, 2008. 88p.

CENTRO BRASILEIRO DE ENERGIA EÓLICA (CBEE). *Panorama da Energia Eólica*. Disponível em: <<http://www.eolica.org.br>>. Acesso em: 01 set. 2008.

CRESESB/CEPEL. *Energia eólica princípios e tecnologias*. Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito. Brasil 2009.



GABRIEL FILHO, L. R. A. *Análise e Modelagem Geométrica da Potência Gerada por um Sistema Híbrido Solar Fotovoltaico Eólico*. Botucatu, 2007. 136p. Tese (doutorado em Energia na Agricultura). UNESP/FCA.

TOLMASQUIM, M.T. *Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil*. CENERGIA. Rio de Janeiro, 2004, 523 p.