

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE  
BOMBEAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO AEROGERADORES DE PEQUENO  
PORTE ACOPLADOS A MOTOBOMBAS POR MEIO DE INVERSORES DE  
FREQUÊNCIA

MAX ALEXANDRE SEABRA DO NASCIMENTO

UFPA/ITEC/PPGEE  
Belém-Pará-Brasil  
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MAX ALEXANDRE SEABRA DO NASCIMENTO

FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DO POTENCIAL DE  
BOMBEAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO AEROGERADORES DE PEQUENO  
PORTE ACOPLADOS A MOTOBOMBAS POR MEIO DE INVERSORES DE  
FREQUÊNCIA

DM 10/2012

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Energia Elétrica.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Biblioteca Central da UFPA- Belém- PA

---

Nascimento, Max Alexandre Seabra do

Ferramenta computacional para análise do potencial de bombeamento de água utilizando aerogeradores de pequeno porte acoplados a motobombas por meio de inversores de frequência / Max Alexandre Seabra do Nascimento. – 2012.

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Pinho

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

1. Bombas hidráulicas. 2. Energia eólica. 3. Bombeamento de água.  
4. Aerogeradores de pequeno porte. I. Título.

CDD 22. ed.: 621.252

---

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que permitiu que trilhasse no caminho certo e por ter colocado pessoas especiais em minha jornada.

A meus pais, Antônio Soares do Nascimento (*in memorian*) e Maria de Nazaré Seabra do Nascimento, pelos sacrifícios visando meu desenvolvimento e de meus irmãos.

Aos meus irmãos, pelo apoio nos momentos de necessidade.

À minha namorada, Elinete, pelo amor, força e coragem dispensados a mim nesta caminhada.

Ao professor João Tavares Pinho (orientador), pela possibilidade de desenvolver meus conhecimentos.

Ao professor Alaan Ubaiara Brito, pela oportunidade dada no desenvolvimento do Projeto AERBOM (Ch. Pub. MCT/FINEP CT-ENERG – Energias Renováveis – 01/2006).

A todos os amigos da família GEDAE, pelo apoio dado nos momentos difíceis e pelas forças no ambiente de trabalho.

Ao GEDAE/INCT-EREEA, pela disponibilização do espaço e dos equipamentos de informática, necessários ao desenvolvimento da dissertação.

Ao IEL/AP e ao IEPA, respectivamente o proponente e o executor do Projeto AERBOM, pela concessão da bolsa.

À FINEP e ao CNPq, pelo apoio financeiro dado ao projeto e ao financiamento da bolsa para desenvolvimento das atividades.

À FAPESPA, pela concessão de bolsa DTI, conforme Edital nº 014/2008 – Seleção Pública de Redes Cooperativas de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação em Áreas de Interesse do Sistema Paraense de Inovação.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xii</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 – SISTEMAS EÓLICOS TRADICIONAIS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 – Evolução Histórica no Mundo.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 – Principais Tipos de Sistema de Bombeamento.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2.1 – Com Transmissão Mecânica.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2.2 – Com Energia Elétrica.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO 2 – ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 – Estudo do Recurso Eólico.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 – A Potência Eólica.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3 – Aerogeradores.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 3 – COMPONENTES DO SISTEMA PROPOSTO.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. – Aerogerador de Pequeno Porte.....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.1 – Caracterização dos Aerogeradores de Pequeno Porte.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2 – Bombas Hidráulicas.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.1 – Classificação e Descrição das Bombas.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.2 – Bombas Centrífugas.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.3 – Potência Hidráulica da Bomba.....</b>	<b>45</b>

<b>3.3 – Inversor de Frequência.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.1 – Características.....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.2 – Parâmetros.....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 4 – ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BOMBEAMENTO DE     ÁGUA.....</b>	<b>53</b>
<b>4.1 – Metodologia e Resultados.....</b>	<b>53</b>
<b>4.2 – Ferramenta Computacional (Programa AERBOM).....</b>	<b>64</b>
<b>4.3 – Análise dos Resultados.....</b>	<b>85</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>87</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um sistema de bombeamento utilizando energia eólica.....	7
Figura 1.2 – Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de bombeamento eólico com acoplamento mecânico.....	8
Figura 1.3 – Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de bombeamento eólico com acoplamento elétrico.....	9
Figura 2.1 – Duração da coleta de dados versus precisão nas estimativas.....	11
Figura 2.2 – Variação da velocidade do vento com a altura.....	11
Figura 2.3 – Tipos de sensores: de velocidade (a) e direção (b) do vento.....	12
Figura 2.4 – Aceleração do vento sobre uma elevação.....	14
Figura 2.5 – Orientações possíveis de linhas de cumeada.....	15
Figura 2.6 – Forma dos montes por ordem de preferência.....	16
Figura 2.7 – Zonas de recirculação em falésia e escarpas.....	16
Figura 2.8 – Fluxo de vento em torno de um edifício.....	19
Figura 2.9 – Fluxo de vento perturbado pela presença de um edifício.....	19
Figura 2.10 – Fluxo de vento passando em uma barreira vegetal.....	20
Figura 2.11 – Deformações causadas pelo vento em diferentes localidades....	22
Figura 2.12 – Índice de deformação das árvores de Griggs-Putnam.....	22
Figura 2.13 – Índice de Barsch.....	23
Figura 2.14 – Cálculo de A, B e C, para estimativa da velocidade de vento....	24
Figura 2.15 – Médias diárias da velocidade de vento no local selecionado para o período de um mês.....	28
Figura 2.16 – Rosa-dos-ventos mostrando a direção predominante de vento no local selecionado.....	28
Figura 2.17 – Histograma de velocidades de vento.....	29

Figura 2.18 – Modelos de aerogeradores de eixo horizontal: multipás, três pás, duas pás e uma pá.....	30
Figura 2.19 – Exemplos de modelos de aerogeradores de eixo vertical: Darrieus e Savonius.....	30
Figura 2.20 – Tipos de aerogeradores com relação à sua orientação: (a) <i>upwind</i> e (b) <i>downwind</i> .....	31
Figura 2.21 – Partes principais típicas de aerogeradores de eixo horizontal....	33
Figura 3.1 – Aerogerador de pequeno porte, modelo Gerar 246, da Enersud..	38
Figura 3.2 – Exemplo de curva de potência de um aerogerador.....	39
Figura 3.3 – Curva de potência do aerogerador BWC XL.1 da <i>Bergey Windpower</i> .....	40
Figura 3.4 – Uso de aerogeradores de pequeno porte com bombas hidráulicas.....	40
Figura 3.5 - Combinações diversas de bombas e turbinas eólicas.....	42
Figura 3.6 – Tipos de rotores das bombas centrífugas.....	44
Figura 3.7 – Principais componentes de uma bomba centrífuga.....	45
Figura 3.8 – Exemplo de curvas da bomba fornecidas pelo fabricante.....	47
Figura 3.9 – Descrição de um inversor de frequência.....	49
Figura 4.1 – Médias horárias e média diária de velocidade de vento para um dia típico.....	53
Figura 4.2 – Histograma de velocidade de vento.....	54
Figura 4.3 – Histograma de velocidade de vento para o mês de Agosto.....	54
Figura 4.4 – Curva de potência do aerogerador Gerar 246.....	55
Figura 4.5 – Energia gerada mensalmente pelo aerogerador.....	56
Figura 4.6 – Vazão de bombeamento estimada utilizando o método teórico....	57
Figura 4.7 – Curva de capacidade instantânea levantada experimentalmente.	58
Figura 4.8 – Vazão de bombeamento estimada utilizando dados experimentais.....	60



Figura 4.9 – Comparação entre os valores de vazão para 10 mca.....	61
Figura 4.10 – Comparação entre os valores de vazão para 30 mca.....	61
Figura 4.11 – Comparação entre os valores de vazão para 50 mca.....	62
Figura 4.12 – Volume diário de bombeamento estimado para o local.....	62
Figura 4.13 – Número estimado de famílias que podem ser atendidas.....	63
Figura 4.14 – Fluxograma padrão do programa AERBOM.....	64
Figura 4.15 – Tela inicial do programa AERBOM.....	65
Figura 4.16 – Tela para seleção de dados de vento.....	66
Figura 4.17 – Dados de vento importados de arquivo .txt para o programa.....	67
Figura 4.18 – Instalação do aerogerador na mesma altura da medição.....	68
Figura 4.19 – Tipos de cobertura que possuem valores tabelados do coeficiente de rugosidade.....	69
Figura 4.20 – Coeficiente de rugosidade correspondente ao tipo de cobertura do solo.....	70
Figura 4.21 – Valores de velocidade média do vento para cada mês do ano..	71
Figura 4.22 – Valores e gráficos referentes às velocidades de vento do local..	72
Figura 4.23 – Gráficos correspondentes ao mês de agosto.....	73
Figura 4.24 – Seleção do aerogerador a ser utilizado na simulação.....	74
Figura 4.25 – Informações referentes ao aerogerador selecionado.....	75
Figura 4.26 – Tela de cadastramento de registros de aerogeradores no banco de dados.....	76
Figura 4.27 – Seleção da bomba e do inversor.....	77
Figura 4.28 – Seleção do conjunto bomba e inversor do banco de dados.....	78
Figura 4.29 – Tela de cadastramento de registros de conjuntos motobomba e inversor obtidos em bancada de ensaio de bombeamento.....	79
Figura 4.30 – Tela para apresentação dos resultados de vazão.....	80

Figura 4.31 – Valores da vazão média mensal de bombeamento.....	81
Figura 4.32 – Volume médio diário bombeado mensalmente.....	81
Figura 4.33 – Número de famílias que podem ser atendidas diariamente em média por mês.....	82
Figura 4.34 – Gráfico da vazão de bombeamento de água.....	83
Figura 4.35 – Gráfico do volume de água bombeado.....	83
Figura 4.36 – Gráfico do número de famílias atendidas.....	84
Figura 4.37 – Rendimento médio global de bombeamento pelo método teórico.....	85

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Coeficiente de rugosidade do solo.....	13
Tabela 2.2 – Tipos de superfície e seus comprimentos de rugosidade.....	18
Tabela 2.3 – Coeficientes de porosidade atribuídos aos obstáculos.....	21
Tabela 2.4 – Classificação de alguns modelos de aerogeradores.....	32
Tabela 2.5 – Classificação dos aerogeradores quanto ao porte.....	37

## RESUMO

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma ferramenta computacional para a análise do potencial de bombeamento de água com base nos valores de velocidades de vento de uma localidade, utilizando um aerogerador de pequeno porte acoplado a um conjunto motobomba convencional, por intermédio de um inversor de frequência.

No trabalho são apresentados dois métodos para o cálculo da vazão. O método 1 utiliza um modelo teórico, enquanto que no método 2 o modelamento é feito a partir de dados de bombeamento obtidos em laboratório. Os dois métodos descrevem o funcionamento de um sistema de bombeamento de água envolvendo os equipamentos citados.

Utilizando os modelos matemáticos descritos, foi criado um programa em linguagem Delphi<sup>®</sup>, para a obtenção dos valores de vazão e volume de água bombeada, além do número de pessoas que podem ser atendidas, com base nos dados de velocidade de vento do local, para com isso, ser possível analisar a viabilidade ou não de instalação do sistema.

O funcionamento do programa é descrito através de um exemplo, que contém valores reais de velocidade de vento, e cujos resultados são analisados de forma a possibilitar seu entendimento.

Palavras-chave – Bombeamento de água, energia eólica, aerogeradores de pequeno porte.

## ABSTRACT

The goal of this dissertation is to allow, through a computational tool, the analysis of the potential of a water pumping system based on the values of wind speeds in one location, using a small wind turbine coupled to a centrifugal pump through a variable speed drive.

In the work two methods for the calculation of the flow are presented. Method 1 uses a theoretical model, while in method 2 the modeling is done from pumping data obtained in laboratory. The two methods describe the operation of a water pumping system involving the above equipment.

Using the mathematical models described, a program was developed in Delphi® to obtain the values for the flow and volume of pumped water, and the number of people that can be supplied on the basis of the data of wind speed for the site, in order to analyze the feasibility of the system.

The operation of the program is described through an example, in order to facilitate its understanding, which contains real values of wind speed, and the results are analyzed.

Keywords – Water pumping, wind energy, small wind turbines.

## INTRODUÇÃO

De maneira geral, a disponibilidade de uma fonte de energia para bombeamento e abastecimento de água é um grande problema para comunidades isoladas da rede elétrica convencional, já que a interligação à rede é muito cara na maioria dos casos. A forma mais comum de resolver esse problema é a utilização de motobombas operando com combustíveis derivados do petróleo, ou mesmo de motobombas elétricas acionadas por grupo geradores, também operando com os mesmos combustíveis. Entretanto, a operação desses sistemas não é tão simples, devido ao custo e à disponibilidade local do combustível, seu transporte, manuseio e armazenamento, manutenção do gerador, além da questão ambiental.

Dessa forma, o uso de energia renovável torna-se muito atrativa para o bombeamento de água nesses locais remotos, sobretudo no aspecto econômico.

O transporte de sistemas de energia renovável para essas comunidades, como aerogeradores e módulos fotovoltaicos, é mais fácil, pois podem ser transportados desmontados, e posteriormente montados no local final de operação.

Sistemas eólicos de bombeamento de água utilizando bombas mecânicas são usados há muitas décadas em várias partes do mundo. Turbinas multipás usadas nesses sistemas acionam, através de transmissão mecânica, bombas de deslocamento positivo e bombas centrífugas.

A bomba de deslocamento positivo mais comum usada nesses sistemas é a bomba de pistão, que é conectada à turbina por meio de um acoplamento mecânico. Esta configuração faz com que a montagem seja simples e de baixo custo, sendo otimizada para operar com baixas velocidades de vento, podendo iniciar o bombeamento com velocidade de vento a partir de 2,5 m/s e chegar à máxima eficiência com ventos entre 4 e 7 m/s, dependendo das características da turbina. Porém, esta configuração de bombeamento eólico possui algumas desvantagens, sendo a mais grave a incompatibilidade entre as características de variação de potência entre a turbina e a bomba de pistão.

A turbina apresenta um aumento cúbico de potência com o aumento da velocidade de rotação, enquanto que na bomba de pistão este aumento de

potência se dá de forma linear com a velocidade de rotação. Assim, a bomba de pistão não utiliza grande parte da potência desenvolvida pela turbina eólica em altas velocidades de vento, e esta baixa eficiência resulta em uma vazão reduzida.

Outra desvantagem é a falha frequente no sistema de transmissão mecânica entre a turbina e a bomba. A aceleração e retardo da conexão mecânica causada pela operação da bomba de pistão coloca forças indevidas sobre a articulação, fazendo com que ela falhe, e essas falhas na transmissão contabilizam mais de 40% do total de manutenção feita em bombas mecânicas (MATHEW, 2006).

Deve-se considerar ainda outra desvantagem, a qual está relacionada à instalação da turbina que deve ser feita diretamente acima da fonte de água e, com essa limitação, a turbina pode não ser instalada em uma área com um maior potencial eólico, mesmo que esta esteja próxima da fonte de água. As bombas de pistão precisam de uma manutenção regular a cada 2 ou 3 anos, para substituir os anéis de vedação da bomba, que se tornam quebradiços e começam a vazar, causando uma redução na vazão da bomba (LEMMER, 2009).

O uso de bombas centrífugas ao invés das bombas de deslocamento positivo resolve a incompatibilidade que existe entre a turbina e a bomba de pistão, porque as bombas centrífugas têm características similares de aumento cúbico de potência com a velocidade de rotação, assim como as turbinas, além de não exigirem alto torque de partida. As bombas centrífugas, no entanto, operam em altas velocidades de rotação em contraste com as baixas velocidades de rotação das turbinas multipás. A característica semelhante de crescimento cúbico de potência entre as bombas centrífugas e as turbinas, significa que se a bomba for otimizada para operar com a turbina em baixas velocidades de vento, ela também funcionará de forma satisfatória com altas velocidades de vento. Esta boa eficiência na transferência de potência entre a turbina e a bomba funcionando em uma ampla faixa de velocidades do vento é vantajosa, porque as condições de vento de um local podem variar bastante.

Com a conexão elétrica entre a turbina e a bomba, existe a possibilidade da turbina ser colocada em um local com melhores condições de vento, mesmo sendo distante da fonte de água. Esta configuração resolve, portanto, a

limitação de mobilidade imposta pela configuração que utiliza o bombeamento com acionamento mecânico.

A montagem simples e a padronização dos componentes do sistema de bombeamento eólico com transmissão elétrica pela indústria significam, portanto, que as instalações existentes de bombeamento com transmissão mecânica e em pequena escala podem ser facilmente convertidas para acomodar a configuração com transmissão elétrica, com a vantagem de um desempenho mais eficiente. Com isso, esses sistemas podem facilmente ser projetados e implementados em uma escala maior. A conexão elétrica direta entre o gerador e o motor também tem a vantagem adicional da flexibilidade, podendo a energia excedente ser utilizada para outros fins, como iluminação, carregamento de baterias, etc.

Porém, deve-se analisar se esse tipo de sistema pode ser instalado em qualquer lugar e, caso possível, estimar quantas pessoas poderão ser atendidas, permitindo com isso, uma avaliação da viabilidade de instalação do sistema.

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma ferramenta computacional para a análise do potencial de bombeamento de água com base nos valores de velocidades de vento de uma localidade, utilizando um aerogerador de pequeno porte acoplado a um conjunto motobomba convencional, por intermédio de um inversor de frequência.

Além desta introdução, a dissertação é composta por mais quatro capítulos e a Conclusão.

No Capítulo 1 são abordados a evolução histórica dos sistemas de bombeamento eólico e os tipos de sistemas existentes.

As técnicas utilizadas no estudo do recurso eólico, a determinação da potência eólica e as características dos aerogeradores estão descritas no Capítulo 2.

O Capítulo 3 apresenta os componentes do sistema de bombeamento eólico proposto para análise, destacando-se as principais características do aerogerador de pequeno porte, do conjunto motobomba e do inversor de frequência.

No Capítulo 4 constam as metodologias utilizadas para análise do potencial de bombeamento de água, o programa desenvolvido em linguagem



de programação Delphi<sup>®</sup> (LEÃO, 2003), que serve de ferramenta para a análise proposta, além da avaliação dos resultados obtidos com o sistema proposto.

Ao final são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 1

### SISTEMAS EÓLICOS TRADICIONAIS DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

#### 1.1 – Evolução Histórica no Mundo

A energia eólica tem sido usada para bombeamento d'água desde o século 13, na Holanda. Bombas eólicas de madeira de pequeno porte também foram utilizadas na França, Portugal e Espanha, bombeando água do mar para produção de sal a partir do século 15, e mais tarde, no século 19, o bombeamento eólico também foi introduzido na América (VAN MEEL e SMULDERS, 1989).

Inicialmente os sistemas eólicos de bombeamento de água com acoplamento mecânico eram utilizados somente para fins domésticos. No início do século 20 estes eram utilizados para dar água aos animais nas grandes planícies da América do Norte.

Hoje em dia, mais de um milhão dos chamados “cata-ventos” estão em uso, a maioria nos EUA, Argentina, Austrália e África do Sul (VAN MEEL e SMULDERS, 1989). Este tipo de bombeamento utiliza um pistão conectado a uma caixa de engrenagens, acionando uma bomba diretamente sobre o poço.

Em geral, os cata-ventos são menos eficientes do que uma turbina eólica de um aerogerador, porque as pás não apresentam um bom perfil aerodinâmico. Devido a isso, o rotor possui uma eficiência máxima de 25% a 30%, quando comparado com a eficiência de 35% a 45% das turbinas eólicas de aerogeradores. Outra diferença é que cata-ventos com várias pás, normalmente entre 12 e 18, produzem um alto torque, necessário para operar a bomba de pistão.

O cata-vento do tipo holandês usa uma bomba do tipo parafuso, que tem torque inicial médio e baixa velocidade inicial. Os tipos americano e australiano usam uma bomba de pistão, que tem alto torque inicial e baixa velocidade operacional. O bombeamento eólio-elétrico utiliza bombas hidráulicas com baixo torque inicial, mas requer altas velocidades operacionais.

O desenvolvimento de aerogeradores para geração de corrente cc ou ca começou no final da década de 1920. Atualmente, com o crescente avanço

tecnológico, são fabricadas comercialmente aerogeradores com potências nominais superiores a 5 MW.

As turbinas eólicas podem ser projetadas para ter eixo horizontal ou vertical, sendo que as de eixo horizontal são as mais utilizadas. As de eixo vertical possuem a vantagem de não necessitarem de posicionamento na direção do vento e os seus principais modelos são o Savonius e o Darrieus. Savonius inventou seu rotor de eixo vertical em 1924. Este tipo de rotor extrai menos de 15% da energia do vento e, por causa dessa deficiência, nunca foi comercializado com sucesso. Os rotores tipo Darrieus, dificilmente são adequados para bombeamento de água, pois necessitam de uma fonte de energia externa, além da força do vento, para iniciar a rotação das pás. Assim, neste trabalho serão considerados apenas turbinas de eixo horizontal.

Uma turbina eólica é baseada em duas forças aerodinâmicas: a sustentação e o arrasto. No sistema por sustentação as pás atuam de modo parecido com as asas do avião através de uma corrente de ar, enquanto o sistema por arrasto é semelhante ao trabalho realizado pela asa de um inseto.

A força de arrasto atua na mesma direção do vento, obstruindo-o parcialmente e criando certa turbulência. Máquinas de arrasto usam pás lisas, curvas, ou em forma de copo. Elas podem produzir alto torque inicial e são ideais para bombeamento de baixos volumes d'água.

Máquinas de sustentação usam perfis aerodinâmicos, onde as pás são dispostas sob uma pequena angulação para deflexionar o vento e produzir uma grande força perpendicular à direção do vento, com pouca força de arrasto. A eficiência máxima que pode ser obtida é de 59% (limite de Betz). Isto torna este tipo de máquina mais adequado para a geração de energia elétrica. Essas máquinas podem operar basicamente com qualquer quantidade de pás, mas turbinas com três pás têm menor vibração e maior estabilidade aerodinâmica (RIBEIRO, 2008).

## **1.2 – Principais Tipos de Sistemas de Bombeamento de Água**

Os sistemas de bombeamento de água utilizando energia eólica são aqueles que captam a energia do vento através de uma turbina eólica,

transmitindo essa energia à bomba através de acoplamento mecânico ou elétrico, que trabalha para a conversão em energia hidráulica. A figura 1.1 mostra um diagrama esquemático de um sistema de bombeamento utilizando energia eólica (GASCH e TWELE, 2001).

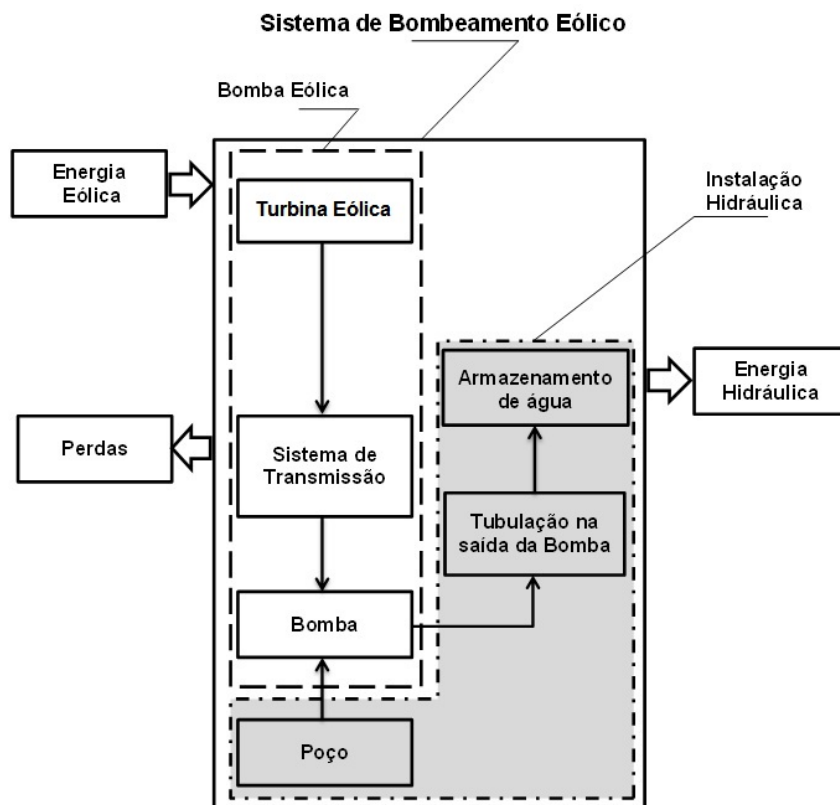


Figura 1.1 – Diagrama esquemático de um sistema de bombeamento utilizando energia eólica.  
(GASCH e TWELE, 2001)

### 1.2.1 – Sistema Eólico de Bombeamento com Transmissão Mecânica

Neste sistema, a energia do vento é convertida em energia mecânica. A figura 1.2 mostra um diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de bombeamento eólico de água com acoplamento mecânico (GASCH e TWELE, 2001). Como a maioria dos sistemas com acoplamento mecânico operam sem um mecanismo de controle, uma variação na velocidade do vento causa uma variação direta no fluxo de água bombeado. A altura manométrica também influencia na conversão de energia.

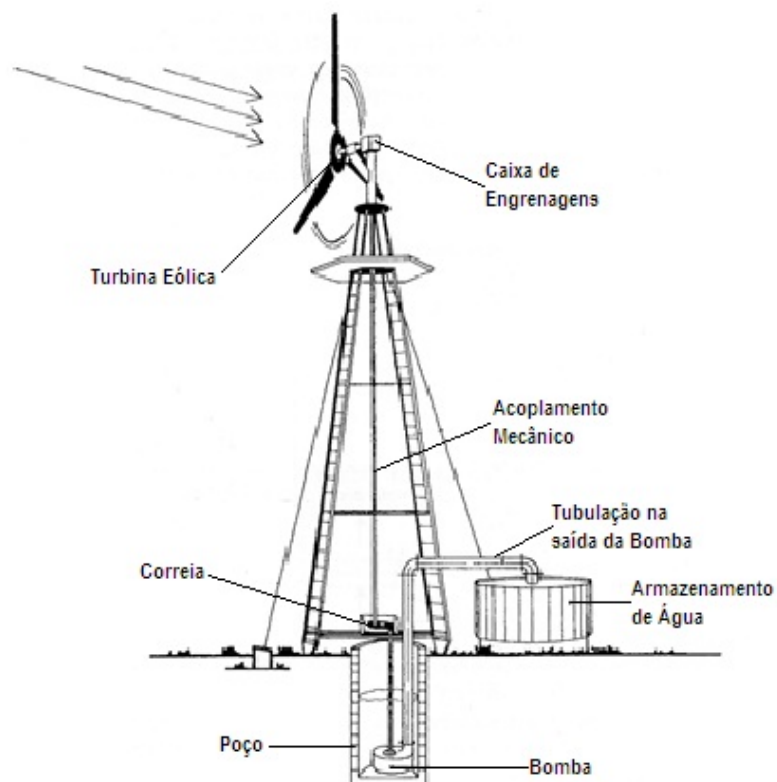


Figura 1.2 – Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de bombeamento eólico com acoplamento mecânico. (GASCH e TWELE, 2001)

Um dos problemas dos sistemas tradicionais de bombeamento d'água é que a energia eólica cresce de forma cúbica com a velocidade do vento e o fluxo de água bombeado de forma linear, o que afeta o desempenho do bombeamento.

A eficiência global anual (conversão da energia contida no vento em água bombeada) é de cerca de 5 a 6%, devido à eficiência de bomba e problemas de acoplamento (SWANEPOEL, 2007).

Sistemas modernos de bombeamento mecânico são projetados para usar turbinas eólicas com 6 a 8 pás com perfil aerodinâmico, ao contrário dos antigos cata-ventos, que tinham de 12 a 18 pás curvas e de aço. O tamanho do rotor também aumentou, e essas mudanças de estrutura proporcionaram uma duplicação da eficiência.

### 1.2.2 – Sistema Eólico de Bombeamento com Acionamento Elétrico

Os aerogeradores modernos podem produzir corrente alternada ou contínua, que pode alimentar diretamente um motor ca ou cc, respectivamente, para bombeamento de água, sendo as bombas centrífugas as mais utilizadas para esse fim.

Um inversor de frequência pode ser adicionado, para fazer o controle da rotação da bomba, tornando o processo de bombeamento mais eficiente.

Os sistemas de bombeamento com transmissão através de energia elétrica, como o mostrado na figura 1.3, têm o dobro de eficiência dos sistemas tradicionais e têm preço competitivo em relação aos sistemas fotovoltaicos, a diesel, ou aos cata-ventos tradicionais.

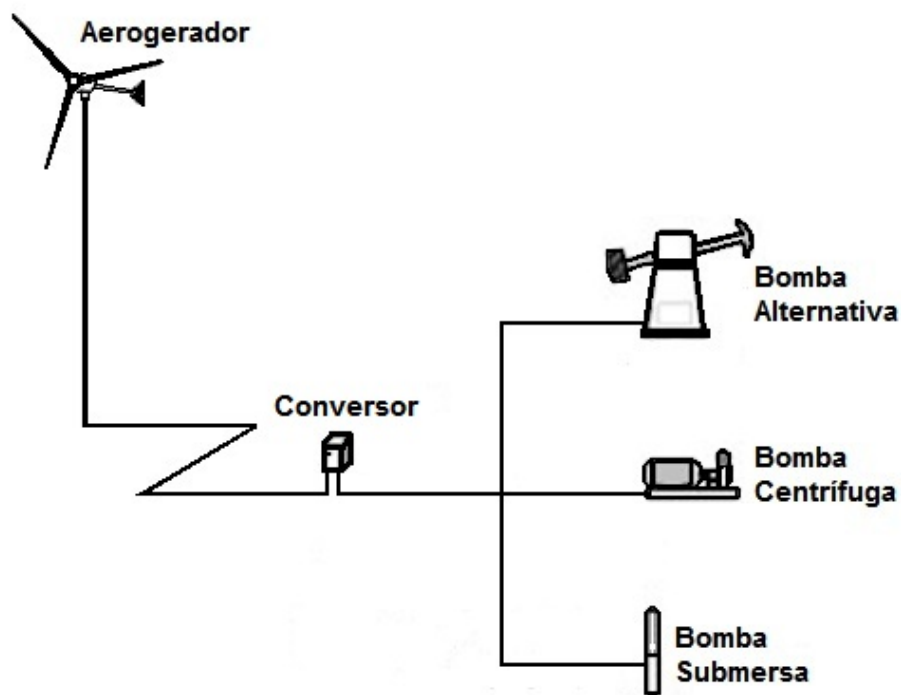


Figura 1.3 – Diagrama esquemático do funcionamento de um sistema de bombeamento eólico com acoplamento elétrico.

## CAPÍTULO 2

### ANÁLISE DO POTENCIAL EÓLICO

#### 2.1 – Estudo do Recurso Eólico

A instalação de um sistema para o aproveitamento do recurso eólico em um determinado local deve ser precedida de considerações sobre diversos fatores. O processo deve iniciar com o conhecimento da demanda de energia no local e a finalidade de aplicação do sistema.

Por exemplo, se em um determinado local se necessita de um equipamento para bombeamento de água sem utilização de um motor elétrico, a instalação deverá ser feita obrigatoriamente no local da captação da água, mesmo que haja outro com melhores condições de vento, ao passo que se a finalidade for a de bombeamento de água com uma bomba acionada por energia elétrica, a instalação em um local mais distante que o da captação da água, porém com melhores condições de vento, torna-se possível, desde que seja também viável economicamente, pois a energia deverá ser transmitida para onde se faça necessária, através de cabos elétricos.

Assim, é importante que seja escolhido o tipo de equipamento mais adequado para cada situação.

Com o objetivo já definido, devem ser realizadas análises das condições de vento na região (velocidade, direção, etc.); orografia (características do relevo); obstáculos (vegetação, construções, etc.); uso do solo (plantações, pasto, etc.); e indicadores naturais (plantas, dunas, etc.). De posse dessas análises torna-se possível definir se a instalação do equipamento é viável ou não.

Um estudo mais complexo desses fatores depende fundamentalmente do tipo de equipamento que se pretende instalar, pois para um gerador eólico de grande potência e um custo elevado, devem ser realizadas análises minuciosas das condições do local, ao passo que para um equipamento de menor porte, os requisitos são menos rigorosos.

Os parâmetros a serem considerados nessa análise são apresentados a seguir.

### a) Velocidade e direção do vento

A correta determinação do fluxo de vento num dado local passa necessariamente pela medição da velocidade e da direção do vento, que são normalmente realizadas nos locais onde se pretende instalar a máquina eólica, idealmente por um período mínimo de 12 meses consecutivos, e, se possível, prolongar por períodos superiores, de forma a reduzir as incertezas associadas à variabilidade interanual dos ventos. A figura 2.1 mostra um gráfico do percentual de precisão para as medições de velocidade do vento com o passar do tempo (SIMÕES,2004).

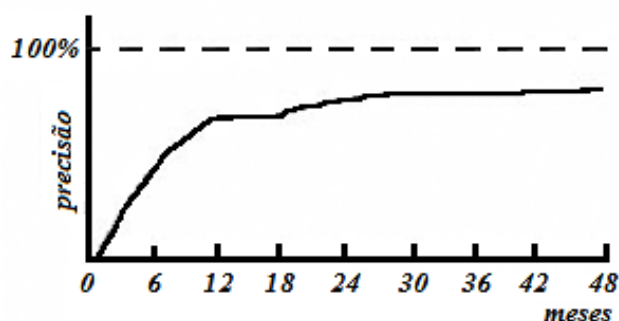


Figura 2.1 – Duração da coleta de dados versus precisão nas estimativas. (SIMÕES,2004)

A velocidade do vento varia com a altura e em função da rugosidade do terreno. A velocidade varia mais rapidamente com a altura nas proximidades do solo e, a partir de uma altura limite com centenas de metros acima do solo, a variação da velocidade não é mais influenciada pela rugosidade. A figura 2.2 mostra a mudança da velocidade do vento até uma altura limite (ROHATGI *et al.*, 1994).

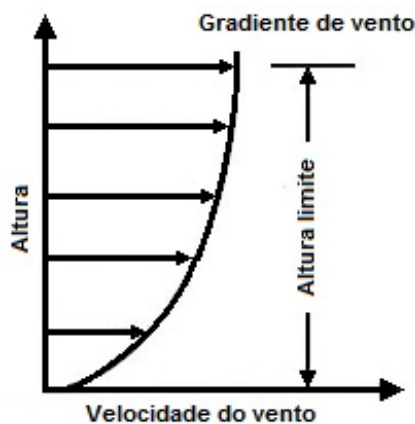


Figura 2.2 – Variação da velocidade do vento com a altura. (ROHATGI *et al.*, 1994)



As medições de velocidade do vento são normalmente obtidas a alturas que podem ir desde a altura padrão meteorológica, 10 m, até superiores a 100 m. Entretanto, é desejável que sejam obtidas tão próximo quanto possível da altura do rotor da turbina a ser instalada. Para estas medições, deve-se ter no mínimo dois sensores de velocidade (um no topo e outro a uma altura intermediária) e um sensor de direção (no topo). A figura 2.3 apresenta um sensor de velocidade (anemômetro) do tipo “concha” e outro de direção (anemoscópio).



Figura 2.3 – Tipos de sensores: de velocidade (a) e direção (b) do vento.

Podem existir situações em que sejam necessários dados de velocidade do vento em alturas diferentes daquelas em que foram medidas. Neste caso, recorrem-se a métodos estatísticos ou às leis exponencial ou logarítmica (de potências) para uma estimativa, a mais confiável possível, dos dados na altura desejada. A equação 2.1 refere-se à lei exponencial, que é geralmente utilizada na área de energia eólica.

$$V_{Z_1} = V_{Z_{ref}} \times \left( \frac{Z_1}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.1)$$

onde:

$Z_1$  → altura na qual se deseja obter a velocidade;

$Z_{ref}$  → altura de referência, na qual se conhecem os dados;

$V_{Z_1}$  → velocidade a se calcular, na altura desejada;

$V_{Zref}$  → velocidade conhecida na altura de referência;

$\alpha$  → coeficiente de Hellmann (rugosidade do solo, com valor tabelado ou experimentalmente determinado).

Os valores para o coeficiente de rugosidade, o tipo de cobertura do solo e a classificação de rugosidade normalmente utilizados são mostrados na tabela 2.1 (PINHO et al., 2008 e OLIVEIRA, 2008).

Tabela 2.1 – Coeficiente de rugosidade do solo (PINHO et al., 2008 e OLIVEIRA, 2008).

<b>Tipo de Terreno</b>	<b>Coeficiente <math>\alpha</math></b>
Lago, Oceano, Solo liso e Neve	0,10
Descampado, Pastagens	0,13
Florestas	0,15
Plantações	0,19
Cercas vivas e Arbustos	0,20
Pequenas cidades com poucas árvores e arbustos	0,25
Grandes cidades com altos edifícios e construções	0,30
Subúrbios	0,32

## b) Orografia

A orografia constitui um dos elementos mais importantes na caracterização dos ventos em um dado local (SIMÕES, 2004), já que a complexidade do terreno em análise (plano, elevações de declive suave, ou terreno montanhoso) influencia no perfil da velocidade do vento. As montanhas, por exemplo, podem alterar as características do ar em movimento de diferentes formas: o aquecimento das encostas das montanhas durante o dia e seu arrefecimento durante a noite, fazem com que o ar adjacente aqueça ou arrefeça e a diferença de temperatura entre o ar perto da montanha e o do ambiente circundante dá origem ao aparecimento de brisa. O vento sobre as montanhas cria gradientes de pressão na direção do fluxo, que juntamente com o atrito com a superfície pode produzir a separação desse fluxo; este fenômeno provoca turbilhões em esteira a montante ou a jusante da montanha, podendo atingir distâncias de várias vezes a altura da montanha, dependendo do declive da mesma.

Quando a separação ocorre a jusante da montanha, a esteira produzida pode ir até 10 ou 20 vezes a altura do cume da elevação, enquanto que quando ocorre a montante, os turbilhões produzidos juntam-se na base da mesma e são limitados pela sua presença. Neste caso, a esteira não vai além de duas vezes a altura da montanha. Este fenômeno é quase inexistente em elevações de inclinação suave e, nesta situação, verifica-se um aumento da velocidade do vento, que pode ir até duas vezes o valor obtido sem a perturbação do terreno. A figura 2.4 mostra a aceleração do vento sobre uma elevação (SIMÕES, 2004).

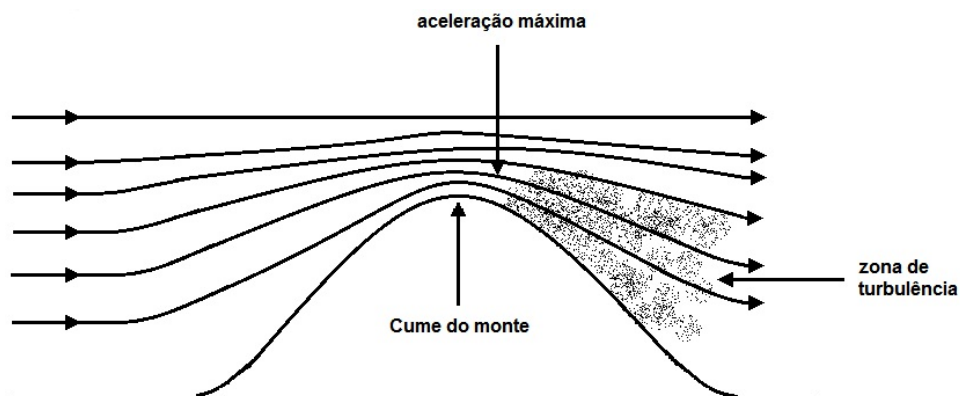


Figura 2.4 – Aceleração do vento sobre uma elevação. (SIMÕES, 2004)

Alguns indicadores de potencialidade de vento, disponíveis por classe de potência (FRADE, 2000), que podem ser observados são:

- desfiladeiros, passagens e gargantas em áreas de frequente gradiente de pressão forte;
- vales longos estendendo-se entre montanhas;
- planícies e platôs em altas elevações;
- planícies e vales com escarpas persistentes e vento associado a gradientes elevados de pressão;
- picos de montanhas;
- locais de áreas costeiras.

A colocação da máquina eólica em pontos elevados tem algumas vantagens, uma vez que esses pontos atuam como uma torre, fazendo com que os efeitos de arrefecimento junto ao solo sejam parcialmente evitados, além de poder existir aceleração do vento, aumentando assim a energia

disponível. Neste tipo de terreno são vários os efeitos a se considerar. Na figura 2.5 apresentam-se várias orientações possíveis e suas respectivas classificações (ROHATGI *et al.*, 1994).

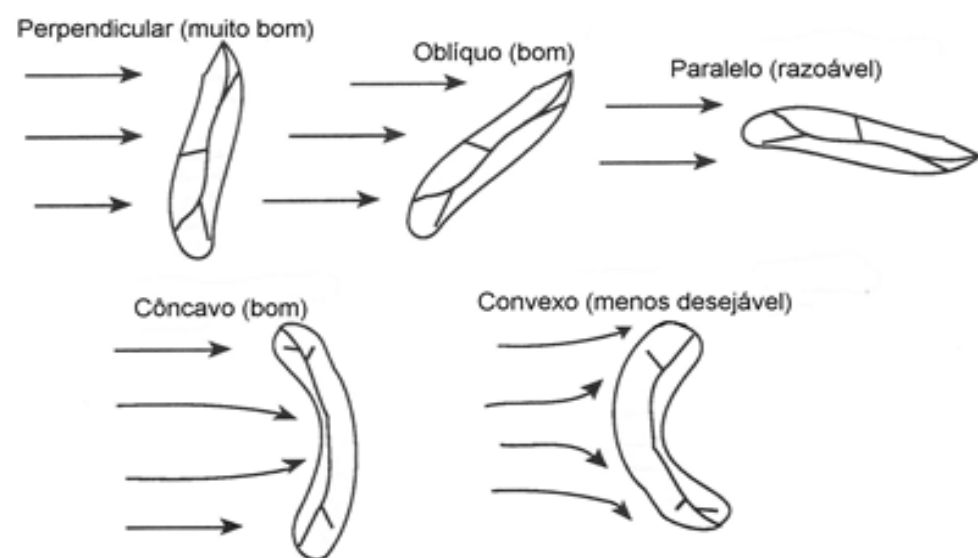


Figura 2.5 – Orientações possíveis de linhas de cumeeada. (ROHATGI *et al.*, 1994)

A orientação das linhas de cumeeada (linhas formadas pelos pontos mais altos da montanha ou cordilheira, no sentido longitudinal) em relação à direção predominante do vento é um fator importante na determinação da quantidade de aceleração do vento sobre o relevo. A forma dos montes condiciona o fluxo, tornando-se um fator importante para a escolha do local, como mostra a figura 2.6 (SIMÕES, 2004).

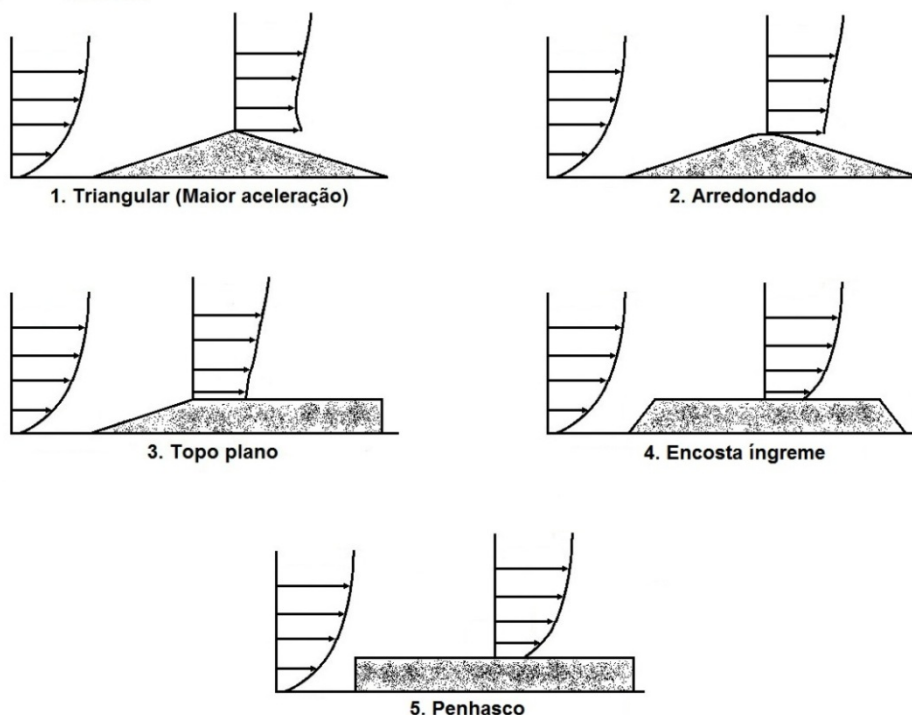


Figura 2.6 – Forma dos montes por ordem de preferência. (SIMÕES, 2004)

A existência de escarpas e falésias introduz zonas de recirculação do fluxo de vento que dificultam o posicionamento dos equipamentos de medição e o aproveitamento da energia do vento. No entanto, se as máquinas eólicas forem posicionadas de forma criteriosa, podem-se aproveitar, fora destas zonas, os locais onde o fluxo acelera e, conseqüentemente, o acréscimo da energia produzida. A figura 2.7 mostra exemplos destas zonas (ROHATGI *et al.*, 1994).

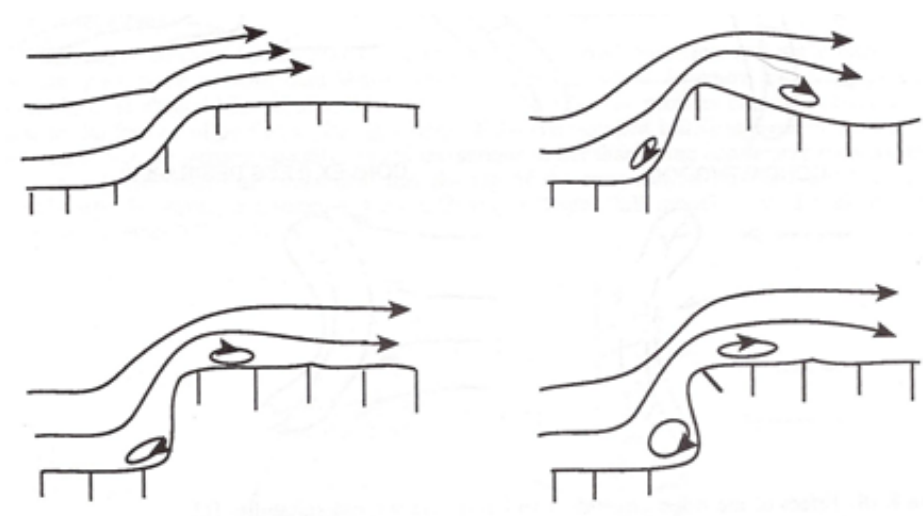


Figura 2.7 – Zonas de recirculação em falésia e escarpas. (ROHATGI *et al.*, 1994)

O fluxo em terreno montanhoso pode, no entanto, resumir-se de acordo com os seguintes parâmetros (SIMÕES, 2004):

- o regime de vento na cumeada não é sujeito a grandes variações, mas depende do local e da época do ano;
- a correlação entre a direção do vento em um terreno complexo e uma dada referência em campo aberto é válida apenas para um local;
- em média, o vento na cumeada é mais elevado no inverno do que no verão;
- mesmo em dias globalmente calmos, pode-se observar no cume ventos com substancial velocidade.

Ainda considerando relevos complexos, existem os casos das depressões acentuadas, como os desfiladeiros ou os vales estreitos com orientação apropriada, onde o fluxo pode ser acelerado, se o vento for “canalizado” ao longo da depressão. Essas depressões estão em geral parcialmente rodeadas de terreno mais elevado, sendo necessário que o local escolhido neste tipo de ambiente esteja na direção predominante de vento.

### c) Rugosidade e obstáculos

A rugosidade do local escolhido é outro parâmetro considerado indispensável na análise de potencial eólico, uma vez que influencia de forma determinante no fluxo de vento junto ao solo e, conseqüentemente, na energia disponível na região de interesse.

O termo rugosidade significa, no sentido mais geral, o tipo de ocupação característica do solo de uma dada região ou local (vegetação, zonas de cultivo, etc.). O local ideal é caracterizado por rugosidade homogênea e reduzida, sendo, no entanto, mais frequente encontrar locais onde existem vários tipos de rugosidade que se interpenetram. Os dados devem ser obtidos com base em visitas ao local pretendido para uma identificação das diferentes tipologias e correta aferição das suas dimensões. Os tipos de superfície e correspondentes comprimentos de rugosidade são apresentados na tabela 2.2 (SIMÕES, 2004).

Tabela 2.2 – Tipos de superfície e seus comprimentos de rugosidade. (SIMÕES, 2004)

<b>Tipo de superfície</b>	<b>Comprimento de rugosidade <math>Z_0</math> (cm)</b>
Água	~0,001
Areia	0,01 – 0,1
Neve	0,1 – 0,6
Relva (~0,01m)	0,1 – 1
Erva baixa	1 – 4
Terreno lavrado	2 – 3
Erva alta	4 – 10
Pinhal	90 – 100
Árvores e algumas casas	20 – 40
Cidade ou grandes aglomerados de casas	80 – 120
Centros de grandes cidades	200 – 300

Nos arredores da torre anemométrica podem existir elementos que não podem ser classificados como rugosidade. Neste caso, denominam-se obstáculos, e é necessário proceder à sua correta identificação e caracterização, para considerar sua influência no comportamento do vento. Os obstáculos podem ser de várias naturezas: casas, depósitos de água, postos de vigia florestais, aglomerados de árvores ou mesmo grandes estruturas de pedra. Algumas considerações sobre o fluxo de vento quando sujeito aos variados tipos de obstáculo são feitas a seguir.

#### ► Edifícios

Muito embora não seja comum instalar aerogeradores nas proximidades de edifícios, este posicionamento pode ocorrer, por exemplo, na proximidade de estruturas urbanísticas. Pode ocorrer também a instalação de torres de medição em terrenos com obstáculos deste tipo, durante o estudo de caracterização geral do vento. As perturbações produzidas pelos edifícios aumentam em altitude a jusante (após o edifício). O fluxo é obstruído pelo edifício formando uma esteira ainda a montante (antes) do mesmo. Após a

passagem pelo obstáculo, forma-se uma esteira em forma de ferradura que se estende ainda a alguma distância a jusante, como se pode ver na figura 2.8 (ROHATGI *et al.*, 1994).

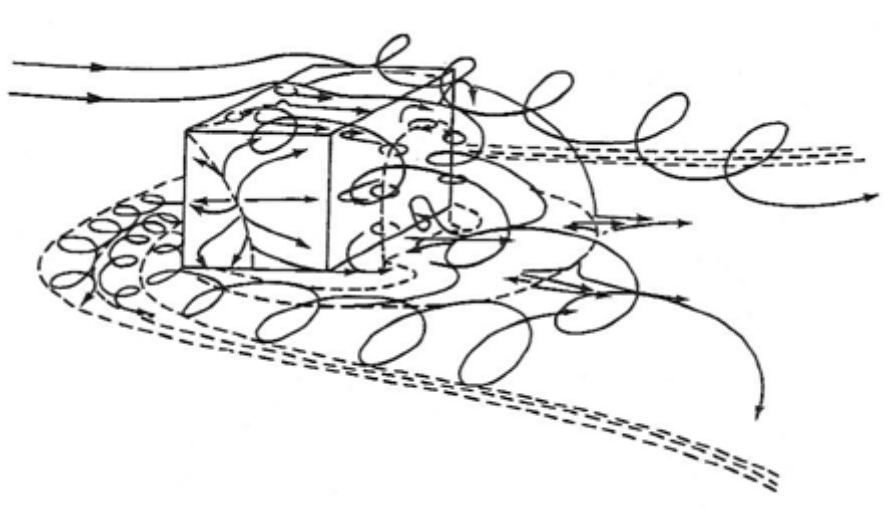


Figura 2.8 – Fluxo de vento em torno de um edifício. (ROHATGI *et al.*, 1994)

Algumas precauções a serem tomadas para evitar a influência de edifícios ao posicionar o sistema eólico são (SIMÕES, 2004):

- a uma distância a montante de mais do que duas vezes a altura do edifício;
- a uma distância mínima a jusante de dez ou mesmo vinte vezes a altura do edifício;
- pelo menos 3 a 5 vezes a direção transversal do edifício, se o sistema eólico for colocado transversalmente ao mesmo em relação ao fluxo.

A figura 2.9 mostra a perturbação do vento na presença de um edifício (SIMÕES, 2004).

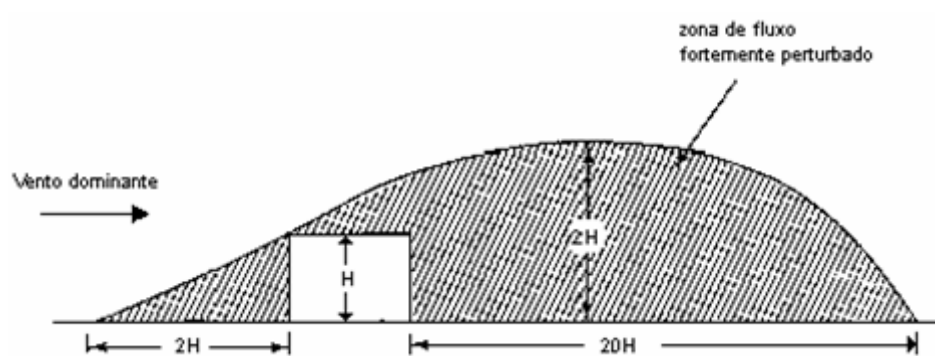


Figura 2.9 – Fluxo de vento perturbado pela presença de um edifício. (SIMÕES, 2004)



### ► Barreiras vegetais

Em regra, as barreiras vegetais são constituídas por filas de árvores posicionadas oblíqua ou perpendicularmente ao local que pretendem proteger. Existem, no entanto, algumas formas de minimizar a influência das barreiras vegetais, tais como, a escolha de um local afastado (a jusante) ou para os lados da barreira ou, em última análise, a utilização de uma torre suficientemente alta para minimizar a perturbação do fluxo de vento.

O grau de perturbação depende da altura, profundidade e porosidade da barreira vegetal. Como porosidade entende-se a percentagem de área aberta que se pode ver quando se olha através da barreira vegetal. Quanto mais alta é a barreira, maior a distância atingida pelo vento perturbado a jusante do obstáculo (figura 2.10) e, conseqüentemente, maior distância é necessária para que o vento recupere a sua energia inicial (ROHATGI *et al.*, 1994).

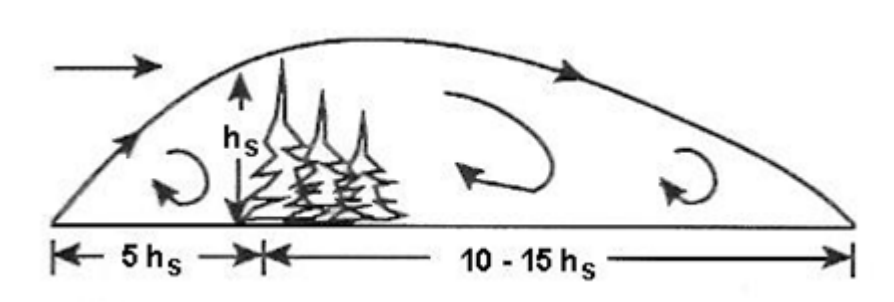


Figura 2.10 – Fluxo de vento passando em uma barreira vegetal. (ROHATGI *et al.*, 1994)

### ► Árvores posicionadas aleatoriamente

A existência de árvores posicionadas de forma aleatória em um local que à primeira vista demonstre algum interesse do ponto de vista energético pode constituir um problema. A esteira produzida por este tipo de obstáculo, embora seja de intensidade mais fraca do que a produzida pelos obstáculos referidos anteriormente, prolonga-se por maiores distâncias. A perda de velocidade pode variar entre 3% e 20%, e a perda de energia produzida pode variar entre 9% e 40%, dependendo estes valores do tipo de folhagem e da distância ao ponto de interesse.

No caso de se escolher um local onde exista este tipo de obstáculo, deve-se considerar a hipótese de instalação de torres anemométricas de alturas elevadas, de forma a minimizar a influência da barreira. A representação dos obstáculos é feita no local através da medição das

distâncias da torre aos dois cantos mais próximos do obstáculo e respectivos ângulos, altura e profundidade. É também atribuído, posteriormente, um coeficiente de porosidade a cada obstáculo, dentre os apresentados na tabela 2.3 (SIMÕES, 2004).

Tabela 2.3 – Coeficientes de porosidade atribuídos aos obstáculos. (SIMÕES, 2004)

<b>Aparência da barreira</b>	<b>Porosidade (P)</b>
Sólida (parede)	0
Muito densa	< 0,35
Densa	0,35 – 0,50
Aberta	0,50

#### d) Deformação das árvores

A vegetação da região a ser estudada pode servir como indicativo do potencial eólico disponível. Quando as plantas sofrem a ação de fatores ambientais como o vento, por exemplo, frequentemente são deformadas (inclinadas) e, medindo-se este grau de deformação, pode-se estimar a média anual da velocidade do vento que atingiu aquela planta. Os arbustos que crescem próximo ao solo apresentam menor deformação que a árvore; porém, a parte copada do arbusto sofre um deslocamento a favor do vento, em relação à sua base. A figura 2.11 apresenta exemplos de deformidades causadas pelo vento em diferentes localidades (VISUALPHOTOS, 2012).



Figura 2.11 – Deformações causadas pelo vento em diferentes localidades. (VISUALPHOTOS, 2012)

Uma forma de se estimar a velocidade do vento tendo como base a deformação é utilizando-se o índice de deformidade para árvores coníferas de Griggs-Putnam, como mostrado na figura 2.12 (JONES, 2000).




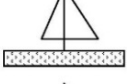

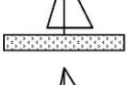







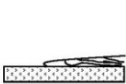

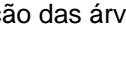
Índice	Vista Superior	Vista Lateral	Descrição da Deformidade	Velocidade de Vento (Média Anual)
0			Nenhuma Deformação	Insignificante
I			Deformação Muito Leve	3 a 4 m/s
II			Deformação Leve	4 a 5 m/s
III			Deformação Moderada	5 a 6 m/s
IV			Deformação Completa	6 a 7 m/s
V			Inclinação Parcial	7 a 8 m/s
VI			Inclinação Completa	8 a 9 m/s
VII			Tombamento	10+ m/s

Figura 2.12 – Índice de deformação das árvores de Griggs-Putnam. (JONES, 2000)

Outro índice semelhante, para árvores hemisféricas, é o índice de Barsch, como mostrado na figura 2.13 (ROHATGI *et al.*, 1994).

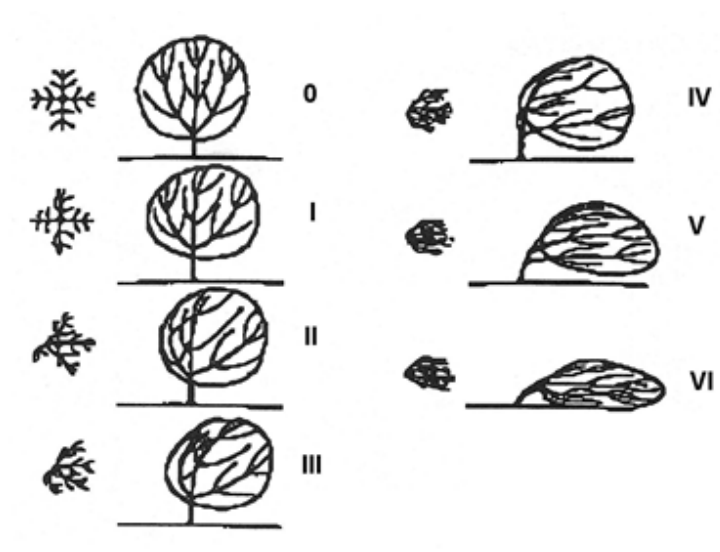


Figura 2.13 – Índice de Barsch. (ROHATGI *et al.*, 1994)

Ambos são divididos em classes, e representam a forma assimétrica da coroa e a deflexão do tronco, causados pelo vento.

Outra possibilidade de se estimar a velocidade de vento é através da fórmula de Ponce-Mattio (equação 2.2), que tem como base o fato da média anual de vento poder ser estimada levando-se em conta a deformação da árvore causada pelo vento. A velocidade do vento é calculada encontrando-se um índice de deformação  $D$  e, de posse desse valor, usa-se a equação 2.3 para encontrar a velocidade de vento ( $V$ ), em m/s, estimada a 30 m de altura.

$$D = \frac{A}{B} + \frac{C}{45^0} \quad (2.2)$$

$$V = 3,62 + 0,46 * D \quad (2.3)$$

A figura 2.14 apresenta a forma de se encontrar os valores de A, B e C para o cálculo da estimativa de vento (ROHATGI *et al.*, 1994).

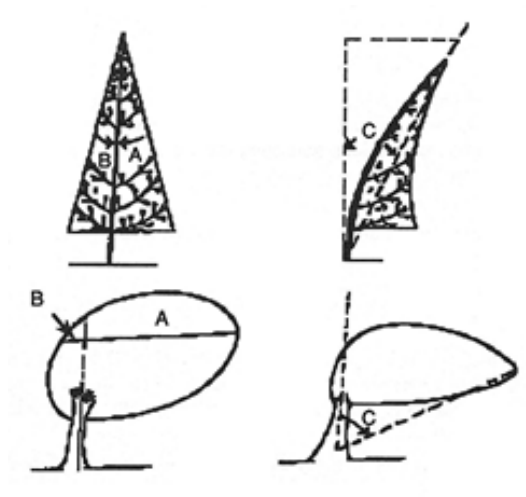


Figura 2.14 – Cálculo de A, B e C, para estimativa da velocidade de vento. (ROHATGI *et al.*, 1994)

A ausência de deformação não implica em um recurso eólico inexistente, pois algumas espécies de árvores são mais sensíveis à influência do vento que outras. Árvores em uma floresta fechada, por exemplo, estão bem próximas, e os ventos podem soprar de mais de uma direção predominante, não ocorrendo, portanto, a deformação das mesmas. A análise deste indicativo de vento deve ser realizada em árvores isoladas ou em pequenos grupos esparsos. Próximo à orla marítima, a deformação das folhagens pode ser resultado da água pulverizada do mar (sal), e não totalmente causada pelo vento. Portanto, o uso da deformação das árvores deve ser utilizado somente como um indicativo e não como uma ferramenta principal para a escolha de um local para a instalação de um aerogerador.

## 2.2 – A Potência Eólica

A disponibilidade de energia eólica está relacionada a vários fatores físicos e geológicos, dependendo da hora, do dia, da estação do ano e de outros aspectos climáticos. O ar mais quente sobe na atmosfera e seu lugar é ocupado por uma massa de ar mais frio, com maior densidade. Essa diferença proporciona um deslocamento de massas denominado correntes de convecção. A energia cinética desse movimento pode ser determinada pela equação 2.4.

$$E_c = \frac{mv^2}{2} \quad (2.4)$$

onde:

$E_c$  – energia cinética do vento (J);

$m$  – massa de ar (kg) que atravessa a área de varredura das pás em rotação;

$v$  – velocidade do vento (m/s).

A taxa de massa de ar que atravessa a área de varredura das pás em um período de tempo é dada pela equação 2.5

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho_{ar} A \frac{dx}{dt} \Rightarrow \dot{m} = \rho_{ar} Av \quad (2.5)$$

A potência disponível no vento (energia por unidade de tempo) pode ser calculada pela equação 2.6.

$$P_v = \dot{E}_c = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 \Rightarrow P_v = \frac{1}{2} \rho_{ar} Av^3 \quad (2.6)$$

onde:

$P_v$  – potência disponível no vento (W);

$\rho_{ar}$  – massa específica do ar no local ( $\text{kg/m}^3$ );

$A$  – área de varredura das pás ( $\text{m}^2$ ).

Esta é a potência do vento livre, antes de incidir e interagir com as pás do aerogerador. Porém, há perdas durante esta ação, pois apenas uma parte da energia do vento é aproveitada, uma vez que o vento atinge a turbina com velocidade “ $v$ ”, mas ainda possui alguma velocidade após passar por ela. Esse dado experimental indica que apenas parte da energia cinética do vento pode ser aproveitada. Para quantificar este índice de aproveitamento, Betz determinou através de seus estudos um “coeficiente de potência” eólico  $C_p$ , cujo valor máximo teórico é  $16/27 = 0,5926$  (Limite de *Betz*). Esse coeficiente relaciona a energia efetivamente captada pela turbina com a energia cinética

total do ar que passa pela área do círculo de raio  $R$  formado pelas pás em rotação.

Define-se o coeficiente de potência como a relação entre a potência mecânica extraída e a potência disponível, indicando a eficiência aerodinâmica do rotor do aerogerador, e representa a fração da potência total disponível do vento que está sendo convertida pela turbina. Pode-se então dizer que o coeficiente é o próprio rendimento da turbina, ou seja, se o coeficiente é 0,4, significa que 40% da energia cinética da massa de ar que incide na turbina é transmitida para o eixo.

A equação 2.6 pode ser rearranjada na forma da equação 2.7, tendo como resultado a densidade de potência, em  $W/m^2$ .

$$\frac{P_v}{A} = \frac{1}{2} \rho_{ar} V^3 \quad (2.7)$$

A potência mecânica fornecida ao eixo do rotor do aerogerador ( $P_m$ ) em função do coeficiente de potência e da potência disponível pode ser determinada pelas equações 2.8 e 2.9.

$$P_m = C_P \cdot P_v \quad (2.8)$$

$$P_m = C_P \cdot \left( \frac{\rho_{ar} \cdot A \cdot V^3}{2} \right) \quad (2.9)$$

Outra correção no valor da potência ainda é necessária, pois devem ser consideradas as perdas mecânicas no eixo, no processo de conversão da energia mecânica em energia elétrica do gerador, nos mancais e acoplamentos. Assim, o rendimento do aerogerador pode ser calculado pela equação 2.10.

$$\eta = C_P \cdot \eta_m \cdot \eta_G \quad (2.10)$$

onde:

$\eta$  – rendimento total do aerogerador;

$C_P$  – coeficiente de potência

$\eta_m$  – rendimento do acoplamento, mancais e do multiplicador de velocidade (se houver);

$\eta_G$  – rendimento do gerador elétrico.

Portanto a potência elétrica ( $P_e$ ) fornecida pelo aerogerador à carga é dada pela equação 2.11.

$$P_e = \frac{1}{2} \eta \rho_{ar} A V^3 \quad (2.11)$$

A equação (2.11) mostra que a energia possível de ser extraída do vento por um aerogerador é proporcional ao cubo da velocidade do vento e depende diretamente da massa específica do ar, que pode ser calculada pela equação 2.12.

$$\rho_{ar} = 1,29 \cdot \frac{P}{760} \cdot \frac{273}{T} \quad (2.12)$$

onde:

$T$  – é a temperatura do local (K);

$P$  – é a pressão atmosférica (mmHg).

Diversos fatores influenciam no desempenho dos aerogeradores, porém, os parâmetros mais importantes a serem considerados para a determinação da capacidade dos aerogeradores são a velocidade do vento, o diâmetro do rotor e o coeficiente de potência. Destes parâmetros, a velocidade do vento é o mais significativo, já que a potência que pode ser convertida pelo aerogerador tem uma variação cúbica com a velocidade de vento, durante o processo de conversão da energia cinética em energia mecânica de rotação. Os valores de velocidade de vento aproveitáveis por um rotor eólico dependem da altura de instalação do aerogerador, das condições meteorológicas e da topografia do local de instalação.

Como exemplo, a figura 2.15 mostra uma curva típica de médias diárias da velocidade de vento para o período de um mês em uma determinada localidade.



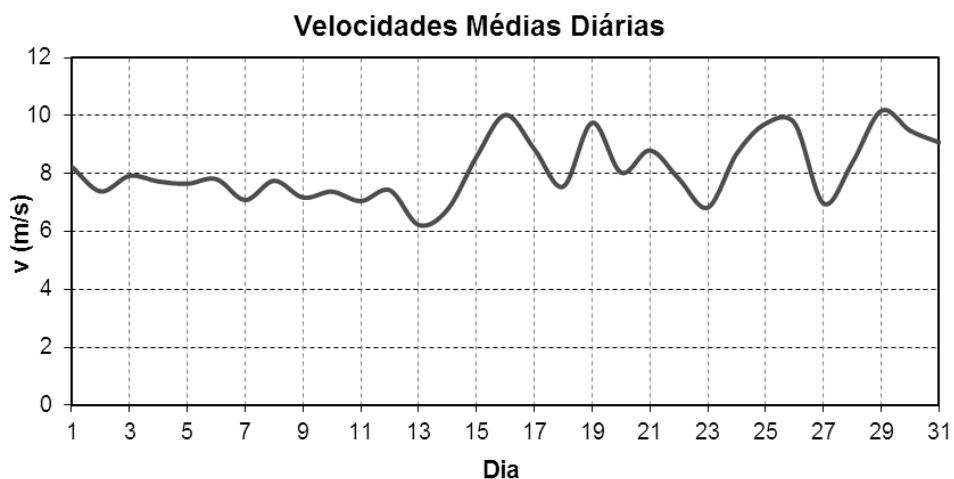


Figura 2.15 – Médias diárias da velocidade de vento no local selecionado para o período de um mês.

Outros fatores que devem ser observados em relação ao potencial eólico do local são a direção predominante do vento, através da rosa-dos-ventos como a mostrada na figura 2.16, e a frequência de ocorrência das velocidades, por intermédio do histograma de velocidades de vento para o período considerado, como o exemplo mostrado na figura 2.17.

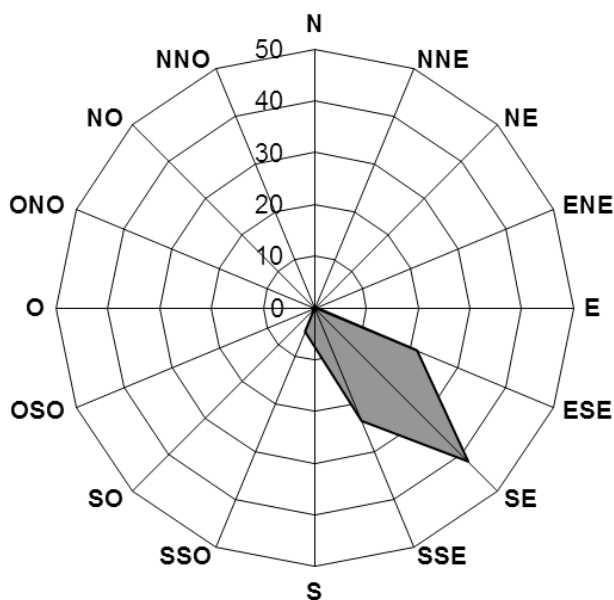


Figura 2.16 – Rosa-dos-ventos mostrando a direção predominante de vento no local selecionado.

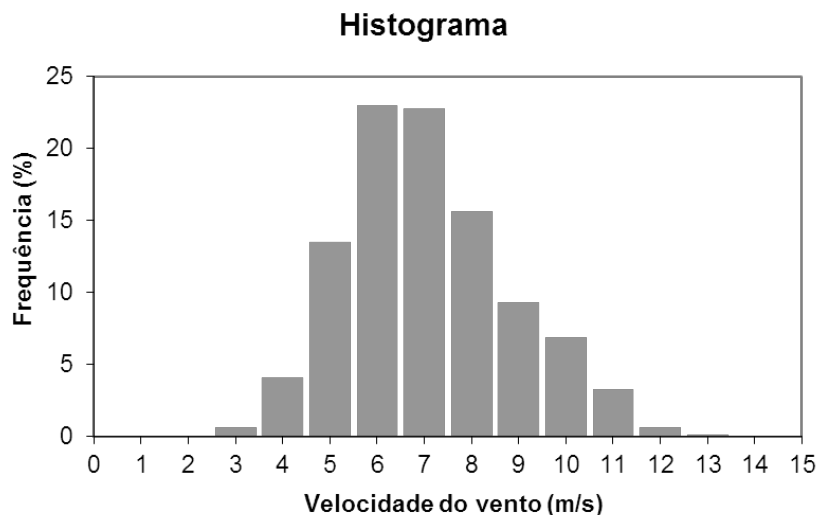


Figura 2.17 – Histograma de velocidades de vento.

### 2.3 – Aerogeradores

O avanço tecnológico dos aerogeradores com o passar do tempo fez com que os moinhos de vento, pioneiros na área de usar a energia eólica para realizar trabalho, fossem substituídos, já que as perspectivas de uso de energia eólica para diversos fins aumentaram, e com isso, novos projetos de aproveitamento de energia eólica foram postos em prática, com a introdução de modernos aerogeradores, cujo desempenho é muito superior aos dos modelos antigos.

Com os aerogeradores, torna-se perfeitamente possível levar energia para regiões remotas, com condições promissoras de vento, onde a rede convencional dificilmente será instalada de forma economicamente viável.

Os aerogeradores podem ser classificados como de eixo horizontal, que possuem seu eixo de rotação situado paralelamente à direção do vento, e os de eixo vertical, que possuem seu eixo de rotação situado perpendicularmente à direção do vento. Os modelos mais comuns de eixo horizontal e de eixo vertical estão mostrados nas figuras 2.18 e 2.19, respectivamente (PINHO *et al.*, 2008).

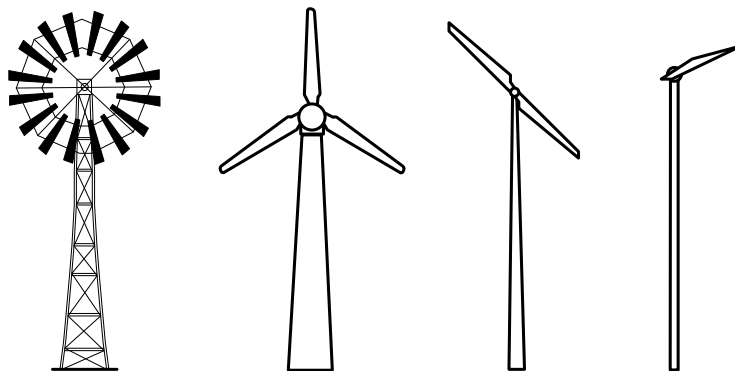


Figura 2.18 – Modelos de aerogeradores de eixo horizontal: multipás, três pás, duas pás e uma pá. (PINHO *et al.*, 2008)

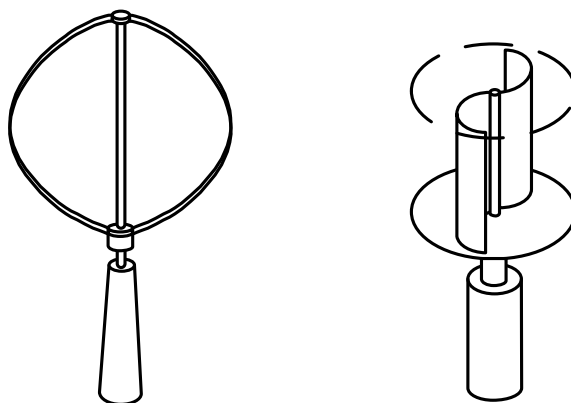


Figura 2.19 – Exemplos de modelos de aerogeradores de eixo vertical: Darrieus e Savonius. (PINHO *et al.*, 2008)

Outra forma de se classificar os aerogeradores é quanto às forças que atuam nas pás em decorrência do fluxo de vento. Essas forças podem ser de sustentação (*lift*) ou de arrasto (*drag*), que podem ocorrer tanto nos aerogeradores de eixo vertical quanto nos de eixo horizontal.

Os aerogeradores que se baseiam na força de arrasto apresentam baixas velocidades (menores que a velocidade de vento), baixo rendimento aerodinâmico e torque relativamente alto no eixo do rotor. Nesta classificação estão os tradicionais cata-ventos multipás e as turbinas Savonius. Já os rotores baseados na força de sustentação apresentam altas velocidades (normalmente muitas vezes maiores que a velocidade do vento), alto rendimento aerodinâmico e baixo torque.

Os aerogeradores de eixo horizontal, principalmente os de três pás, são atualmente muito mais utilizados para geração de energia elétrica, pois

possuem um rendimento maior do que os de eixo vertical. Entretanto, os de eixo vertical têm a vantagem de possuir o gerador instalado na base, ao nível do solo, e a possibilidade de captar a energia dos ventos sem a necessidade de um mecanismo de orientação.

Quando a intenção é a geração de eletricidade, o eixo do rotor deve operar com altas velocidades e, por possuírem maior eficiência aerodinâmica, os equipamentos de sustentação tornam-se os mais indicados. Entre os aerogeradores mais comuns desta categoria estão os de turbinas de eixo horizontal de três pás e Darrieus.

Existe ainda outro critério, também importante, para que se possa classificar os aerogeradores, que é a orientação de seu rotor em relação ao fluxo de vento, podendo ser do tipo *upwind* (posição do rotor a montante da torre) ou *downwind* (rotor a jusante da torre). Aerogeradores do tipo *downwind* apresentam como vantagem o fato de não necessitarem de mecanismos de orientação em relação à direção do vento. Porém, a própria torre torna-se um obstáculo ao fluxo de vento, podendo ocasionar maiores perdas. Devido a esta desvantagem, esses tipos de rotores são menos utilizados que os *upwind*, pois estes, apesar de necessitarem de dispositivos de orientação para a direção do vento, têm maior eficiência. Aerogeradores com essas classificações estão ilustrados na figura 2.20 (PINHO *et al.*, 2008).

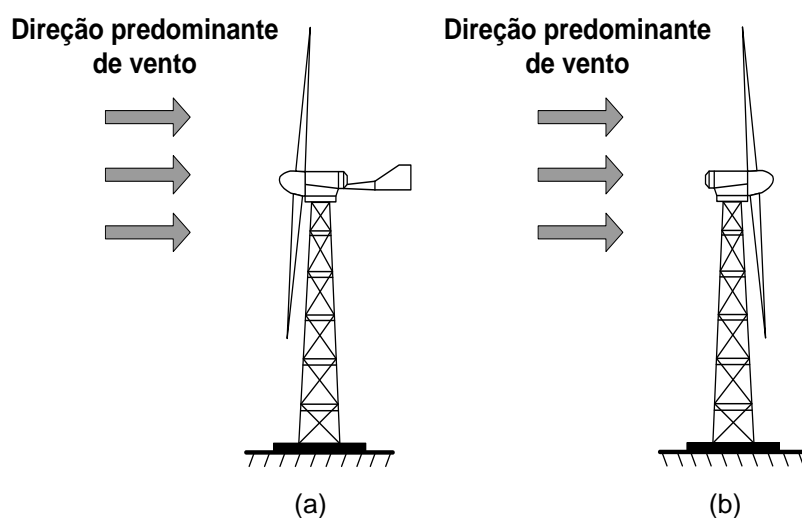


Figura 2.20 – Tipos de aerogeradores com relação à sua orientação: (a) *upwind* e (b) *downwind*. (PINHO *et al.*, 2008)

De acordo com os critérios mencionados, a classificação de alguns aerogeradores de acordo com seu rotor, está mostrada na tabela 2.4 (PINHO *et al.*, 2008).

Tabela 2.4 – Classificação de alguns modelos de aerogeradores. (PINHO *et al.*, 2008)

<b>Tipo de rotor</b>	<b>Eixo</b>	<b>Força predominante</b>	<b>Rotação</b>	<b>Torque</b>	<b>Carga típica</b>
	horizontal	sustentação	alta	baixo	gerador elétrico
	horizontal	arrasto	baixa	alto	bomba hidráulica
	horizontal	sustentação	moderada	moderado	gerador elétrico / bomba hidráulica
	vertical	sustentação	alta	baixo	gerador elétrico
	vertical	arrasto	baixa	alto	bomba hidráulica

Os principais componentes de um aerogerador são: nacelle, rotor, transmissão (multiplicador de rotação), gerador, torre, entre outros. A figura 2.21 apresenta as possíveis configurações das partes constituintes de um aerogerador (PINHO *et al.*, 2008).

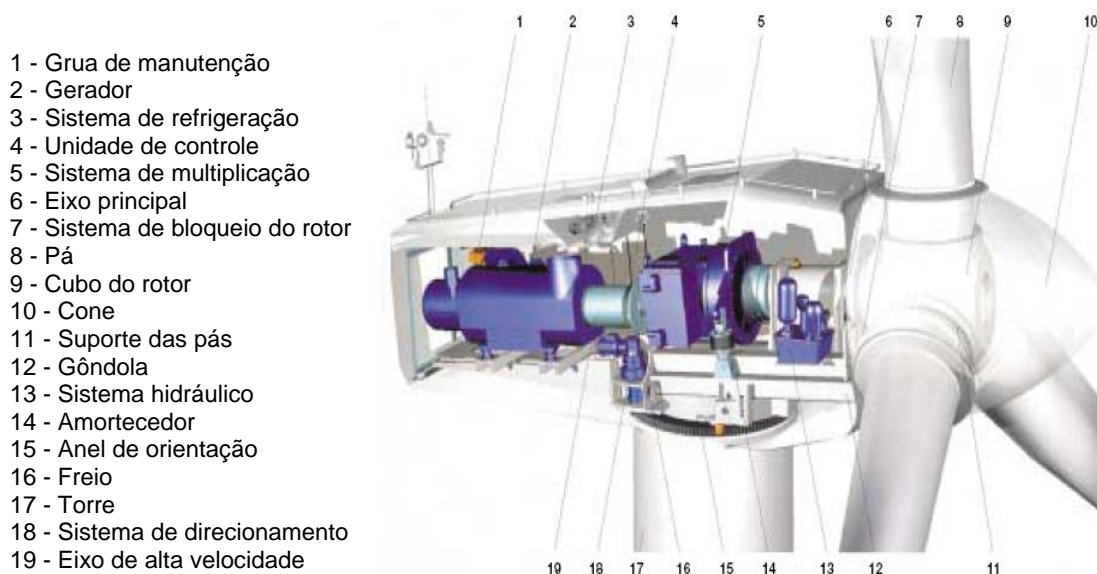


Figura 2.21 – Partes principais típicas de aerogeradores de eixo horizontal. (PINHO *et al.*, 2008)

Alguns dos componentes do aerogerador mostrados na figura 2.21 são particulares para determinados modelos. Elementos como o rotor (constituído pelo cubo, cone e pás), o gerador, a torre e a gôndola são característicos de aerogeradores, necessários para o bom funcionamento de qualquer modelo e em qualquer aplicação. Porém, sistemas de transmissão e orientação, por exemplo, são utilizados apenas para determinadas configurações de aerogeradores. Os componentes característicos de sistemas eólicos são apresentados a seguir.

#### a) Nacele

A nacele é a estrutura que abriga o gerador elétrico, a caixa de engrenagens, os freios, os controladores, dentre outros. Ela pode estar localizada antes ou depois da turbina eólica e a sua função é proteger os equipamentos contra as intempéries.

#### b) Rotor

O rotor é a parte girante da máquina, que capta a energia eólica com o auxílio das pás.

Existem dois tipos de rotores: aqueles que possuem eixo vertical e os que possuem eixo horizontal. Além dessa classificação, outra pode ser adotada, a qual leva em consideração as qualidades das forças predominantes, que podem ser de arrasto ou de sustentação.

Os aerogeradores mais modernos apresentam o rotor com eixo horizontal, na maioria das vezes, com três pás; porém, existem rotores que possuem duas ou outra quantidade de pás.

#### c) Caixa de Transmissão (Multiplicador)

Este equipamento é responsável por transmitir a energia mecânica, através de um sistema de engrenagens, entregue pelo eixo do rotor até a carga, que no caso é o gerador. Os rotores apresentam baixas rotações, em torno de 20 a 150 rpm, e os geradores operam com rotações muito mais elevadas, em torno de 1.200 a 1.800 rpm; por isso, faz-se necessária a presença da caixa de transmissão. Atualmente já existem aerogeradores que não apresentam a caixa de transmissão, ou seja, é realizado o acoplamento direto entre o rotor e o gerador, que, nesse caso, apresenta um maior número de polos (NUNES, 2003).

#### d) Gerador Elétrico

O gerador é o responsável por transformar a energia mecânica entregue ao seu eixo em energia elétrica na saída de seus terminais. Existem geradores assíncronos, síncronos e em corrente contínua.

O gerador assíncrono pode ser encontrado com o rotor configurado em gaiola ou com uma configuração na qual a máquina apresenta dupla excitação, conforme descrito a seguir.

##### d.1) Gerador em Gaiola

A máquina assíncrona com rotor em gaiola pode ser interligada à rede elétrica através de um conversor estático para propiciar a operação em velocidade variável; porém, este conversor deve ser dimensionado com a potência idêntica à do gerador elétrico, para que o processamento da energia advinda do estator possa ser realizado.

Em sistemas isolados, a energia reativa necessária para criar o campo magnético do estator pode ser fornecida por um banco de capacitores (RECH *et al.*, 2008).

#### d.2) Gerador Assíncrono Duplamente Excitado - GADE

Além da máquina assíncrona com rotor em gaiola, existe também o gerador assíncrono com o rotor bobinado. Este gerador possui enrolamento trifásico no estator, enrolamento trifásico no rotor e anéis coletores no eixo, para acesso ao enrolamento através das escovas de carbono. Ele é dito duplamente excitado, por ser alimentado simultaneamente pelo estator e pelo rotor. Este tipo de máquina é mais complexo que a máquina assíncrona com rotor em gaiola e, portanto, mais caro, requerendo ainda maior manutenção.

#### d.3) Gerador Síncrono

O gerador síncrono pode ser encontrado com o rotor bobinado ou com ímãs permanentes.

O gerador síncrono com rotor bobinado é mais utilizado em sistemas que operam com variação de velocidade. Ele possui o rotor de polos salientes, com um grande número de polos, e opera com baixa velocidade de rotação, o que possibilita o acoplamento direto entre o rotor e o gerador.

O gerador síncrono com ímãs permanentes pode ser utilizado para as mesmas aplicações do gerador comentado anteriormente; porém, como ele apresenta seu campo magnético principal gerado por ímãs, torna-se difícil realizar o controle da tensão de campo e do fator de potência na saída do gerador. Quando existem variações na velocidade do eixo do rotor ou na corrente de carga, a regulação da tensão na saída dos terminais da máquina torna-se um problema. Por esses motivos, este tipo de máquina quando equipada com conversor ca/ca com elo dc é adequado para integração de aerogeradores operando com velocidade variável.

Além das máquinas que operam em corrente alternada, existem também as que operam em corrente contínua; porém, esses geradores



são mais caros e têm maior custo de manutenção (CAMPOS, 2004). Encontram-se poucas utilizações dessas máquinas como geradores eólicos; como exemplos podem ser citados os sistemas para carregamento de baterias, que operam sob condição de velocidade angular variável (AMORA, 2001).

#### e) Sistema de Frenagem

Os aerogeradores possuem sistemas de freios para utilização em situações onde haja alta velocidade de vento, perdas de conexão com a rede elétrica ou outros tipos de emergência que venham a ocorrer. Esse sistema é necessário, devido ao fato de que a potência gerada pelo aerogerador é proporcional ao cubo da velocidade do vento, ou seja, para grandes variações de vento a potência gerada torna-se muito elevada, podendo danificar os equipamentos do aerogerador. Existe o freio aerodinâmico, o qual altera o ângulo de ataque das pás do rotor, ou pode também mover a estrutura do aerogerador (nacele) em relação ao fluxo do vento. O outro tipo de freio que existe é o mecânico, que atua diretamente no eixo do rotor, fazendo com que a velocidade do rotor diminua até a sua parada completa (WALKER e JENKINS, 1997).

#### f) Sistema de Direcionamento

Os aerogeradores de grande porte possuem um sistema de direcionamento que faz com que a nacele gire de acordo com a direção do vento. Para isso ocorrer, existem sensores que indicam a direção do vento e um sistema de engrenagens na ligação da torre com a nacele, a qual é movimentada através da ação de um atuador elétrico ou hidráulico.

Para os aerogeradores de menor porte, existe um sistema no qual é feito o deslocamento do aerogerador através do leme localizado na parte de trás do mesmo. Para alguns aerogeradores, esse sistema de direcionamento também é utilizado quando ocorrem situações de turbulência de vento, fazendo com que a nacele gire para uma direção diferente da direção do vento, evitando com isso que o equipamento sofra algum tipo de dano (WALKER e JENKINS, 1997).

## g) Torre

As torres, utilizadas para sustentar a nacela juntamente com os demais componentes, apresentam suas estruturas metálicas que podem assumir configuração treliçada ou tubular, em conformidade com a potência do gerador.

Os aerogeradores mais modernos, de médio e grande porte, com faixa de operação compreendida entre centenas de kW a unidades de MW, apresentam estrutura tubular metálica constituída por uma liga de aço carbono, ou estrutura em concreto armado, com a possibilidade de se fazer a manutenção dos equipamentos na nacela subindo pelo interior da torre, mesmo em condições meteorológicas desfavoráveis.

O valor da potência elétrica nominal de um aerogerador define sua classificação quanto ao porte, como apresentado na tabela 2.5 (PINHO *et al.*, 2008).

Tabela 2.5 – Classificação dos aerogeradores quanto ao porte. (PINHO *et al.*, 2008)

Classificação	Potência nominal (kW)
Pequeno porte	$P_n < 100$
Médio porte	$100 \leq P_n < 1.000$
Grande porte	$P_n \geq 1.000$

Para se aumentar a geração é possível juntar vários aerogeradores e com isso formar parques eólicos. Quando esses parques são montados na terra chamam-se de parques eólicos *on-shore*, e quando montados no mar, parques eólicos *off-shore*.

## CAPÍTULO 3

### COMPONENTES DO SISTEMA PROPOSTO

#### 3.1 – Aerogeradores de Pequeno Porte

A definição de porte do aerogerador é feita a partir de sua potência nominal e, neste trabalho, são utilizados aerogeradores com potências abaixo de 100 kW, que caracterizam os aerogeradores de pequeno porte, apropriados para utilização em larga escala nas comunidades isoladas.

Um exemplo de um aerogerador de pequeno porte, modelo Gerar 246 de 1 kW fabricado pela Enersud, está mostrado na figura 3.1 (ENERSUD, 2011).



Figura 3.1 – Aerogerador de pequeno porte, modelo Gerar 246, da Enersud. (ENERSUD, 2011)

##### 3.1.1 – Caracterização dos Aerogeradores de Pequeno Porte

Para se caracterizar qualquer aerogerador, independentemente do porte, é preciso que se tenha conhecimento de algumas de suas características

como: curva de potência, tipo de eixo, número de pás, potências nominal e máxima, etc.

Os parâmetros do aerogerador, fornecidos pelo fabricante, deverão ser observados pela análise de sua curva de potência, que está exemplificada na figura 3.2 (PINHO *et al.*, 2008).

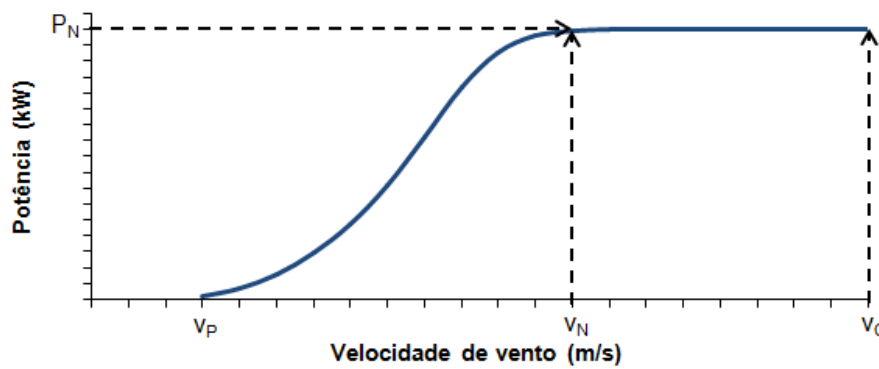


Figura 3.2 – Exemplo de curva de potência de um aerogerador. (PINHO *et al.*, 2008)

Os parâmetros a serem analisados da curva de potência de um aerogerador são (PINHO *et al.*, 2008):

- $V_P$ : Velocidade de partida (*cut-in*) – velocidade de vento mínima para que o rotor saia de seu estado de repouso inicial, produzindo torque mecânico e iniciando o movimento das pás e consequente geração de energia;
- $V_G$ : Velocidade mínima de geração – valor mínimo de velocidade de vento na qual a geração de energia ainda é possível, determinada pelas perdas na transmissão. É normalmente um valor de velocidade levemente inferior ao de partida;
- $V_N$ : Velocidade nominal – velocidade de vento na qual a potência nominal ( $P_N$ ) do aerogerador é extraída;
- $V_C$ : Velocidade de corte (*cut-out*) – valor de velocidade de vento no qual a regulação atua para interromper o movimento do rotor eólico, protegendo-o contra cargas excessivamente altas e danos estruturais.

A figura 3.3 mostra a curva de potência de um aerogerador de pequeno porte de 1 kW, modelo BWC XL.1 da *Bergey Windpower* (BERGEY, 2000).

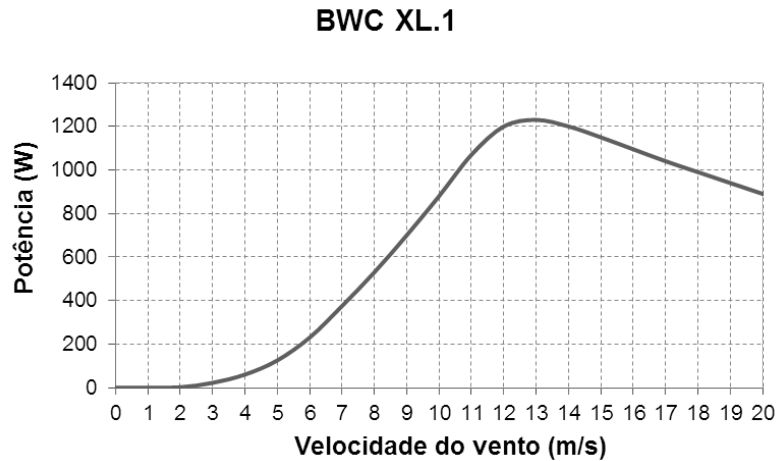


Figura 3.3 – Curva de potência do aerogerador BWC XL.1 da *Bergey Windpower*. (BERGEY, 2000)

Os aerogeradores de pequeno porte são utilizados para provimento de energia em escalas variadas, para atendimento desde uma comunidade isolada, até pequenos arranjos para gerar eletricidade em parques eólicos compostos por pequenos aerogeradores. Nestas escalas, os aerogeradores de pequeno porte são usados para suprimento de água, dessedentação de animais, irrigação e drenagem de várzeas, podendo ou não estar associados a outros dispositivos de geração e armazenamento de energia em sistemas híbridos (sistemas com mais de uma fonte de energia).

A figura 3.4 apresenta os principais usos dos aerogeradores de pequeno porte com bombas hidráulicas (FERREIRA, 2006).

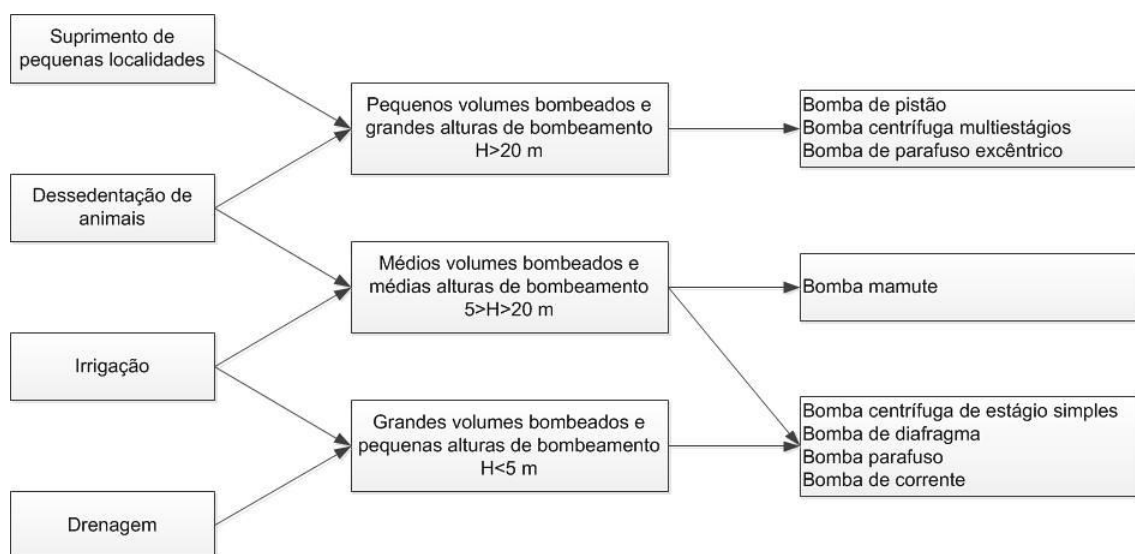


Figura 3.4 – Uso de aerogeradores de pequeno porte com bombas hidráulicas. (FERREIRA, 2006)

## 3.2 – Bombas Hidráulicas

São Máquinas Hidráulicas Operatrizes, isto é, máquinas que recebem energia mecânica (força motriz de um motor ou turbina), e a transformam em energia hidráulica, a qual é fornecida ao fluído, com a finalidade de transportá-lo de uma posição de menor energia potencial para outra de maior energia potencial.

De uma maneira geral, as bombas devem apresentar as seguintes características principais:

- a) Resistência: estruturalmente adequadas para resistir aos esforços provenientes da operação (pressão, erosão, esforços mecânicos);
- b) Facilidade de operação: adaptáveis às mais usuais fontes de energia e que apresentem manutenção simplificada;
- c) Alto rendimento: transformem a energia com o mínimo de perdas;
- d) Economia: tenham custos de aquisição e operação compatíveis com as condições de mercado.

### 3.2.1 – Classificação e Descrição das Bombas

As bombas podem ser divididas em duas categorias.

- Turbo-Bombas, Hidrodinâmicas ou Rotodinâmicas – são máquinas nas quais a movimentação do líquido é proporcionada por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação de uma peça interna (ou conjunto dessas peças) dotada de pás ou aletas, chamada de rotor.
- Volumétricas ou de Deslocamento Positivo – são aquelas em que a movimentação do líquido é causada diretamente pela movimentação de um dispositivo mecânico da bomba, que imprime ao líquido um movimento na direção do deslocamento do citado dispositivo, em quantidades intermitentes, de acordo com a capacidade volumétrica da bomba, promovendo enchimentos e esvaziamentos sucessivos, provocando, assim, o deslocamento do líquido no sentido previsto.

A figura 3.5 mostra as combinações de diversas bombas e turbinas eólicas (GASCH e TWELE, 2001).

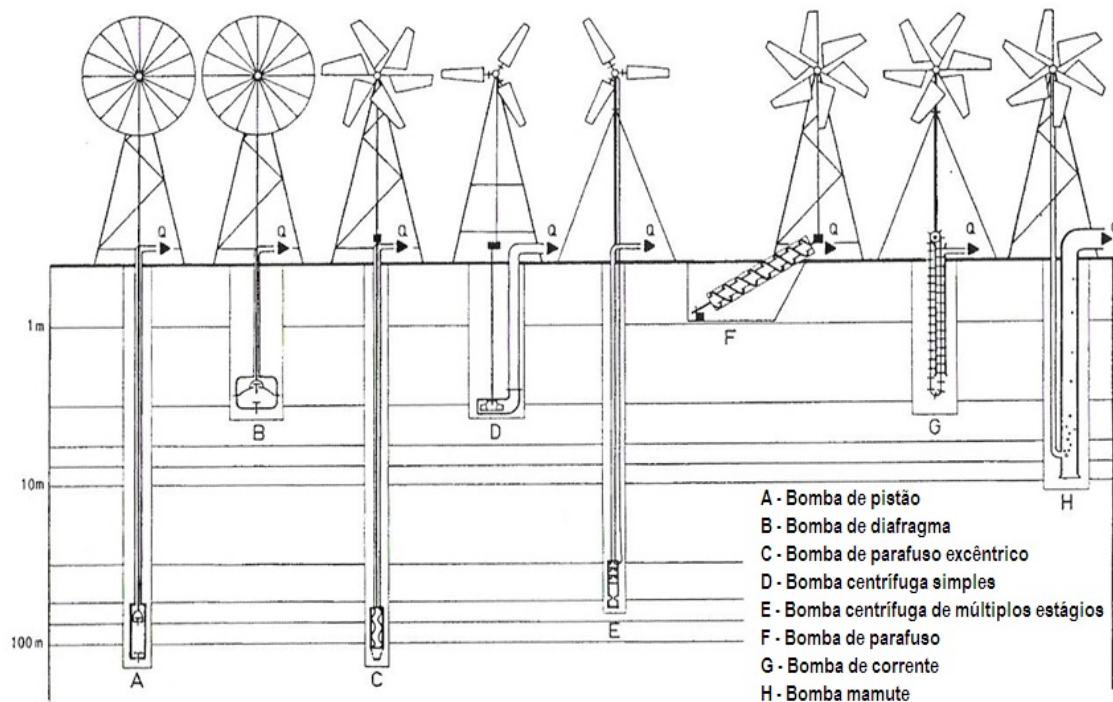


Figura 3.5 - Combinações diversas de bombas e turbinas eólicas. (GASCH e TWELE, 2001)

De acordo com a finalidade, a escolha da bomba a ser utilizada deve levar em consideração as seguintes observações:

- A bomba de pistão é simples e eficiente para poços, sendo a mais utilizada em sistemas com transmissão mecânica;
- A bomba de diafragma não é compatível com poços. Ela é geralmente utilizada como bomba de sucção para baixas alturas manométricas, sua eficiência é baixa em relação à de pistão e os diafragmas têm curta vida útil;
- A bomba do tipo parafuso de Arquimedes é muito boa para bombear águas superficiais. Elas são fáceis de serem produzidas, mas requerem uma grande quantidade de material;
- A bomba centrífuga de estágio simples, pode ser acoplada a um sistema de bombeamento com alimentação elétrica, e também é muito versátil, pois pode ser utilizada em poços ou em superfície.
- A bomba centrífuga de múltiplos estágios é a mais utilizada com motores submersíveis e com acoplamento elétrico aos aerogeradores. Com

essas bombas, a altura manométrica pode ser aumentada com o aumento dos estágios.

- A bomba injetora é utilizada para bombeamentos com vazões de pequeno a médio porte, com profundidades variadas, funcionando tanto com energia elétrica como com combustível. Sua instalação é feita com um bico injetor (ou válvula de pé), dentro do poço mediante dois canos (tubo injetor fino e tubo edutor grosso), que liga o bico injetor à bomba que fica fora do poço, dentro de uma casa de bomba. Da bomba, sai um cano que conduz a água ao reservatório (COSTA FILHO *et al.*, 1998).

### 3.2.2 – Bombas Centrífugas

As bombas centrífugas são máquinas que fornecem energia ao líquido por meio da ação da força centrífuga, a fim de promover seu escoamento. Elas transformam o trabalho mecânico proveniente de fontes externas em energia cinética e de pressão, que são cedidas ao líquido (LIMA, 2003).

O funcionamento da bomba centrífuga baseia-se na criação de uma zona de baixa pressão e de uma zona de alta pressão. Para isso, é necessário que a carcaça esteja completamente cheia de líquido e, portanto, que o rotor esteja mergulhado nesse líquido.

Devido à rotação do rotor, provocada por uma fonte externa de energia, geralmente um motor elétrico, o líquido que se encontra entre as palhetas no interior do rotor é arrastado do centro para a periferia pelo efeito da força centrífuga. Produz-se assim uma depressão interna ao rotor, o que acarreta um fluxo vindo através da conexão de sucção. O líquido impulsionado sai do rotor pela sua periferia, em alta velocidade, e é lançado na carcaça que contorna o rotor, onde grande parte da energia cinética do líquido é transformada em energia de pressão durante a sua trajetória para a boca de recalque.

Em função dos tipos e formas dos rotores, as bombas centrífugas podem ser divididas em:

- Radiais ou Puras – quando a direção do fluido bombeado é perpendicular ao eixo de rotação;



- Fluxo Misto ou Semi-Axial – quando a direção do fluido bombeado é inclinada em relação ao eixo de rotação;
- Fluxo Axial – quando a direção do fluido bombeado é paralela ao eixo de rotação.

A figura 3.6 apresenta os tipos de rotores das bombas centrífugas (SILVA *et al.*, 2003).

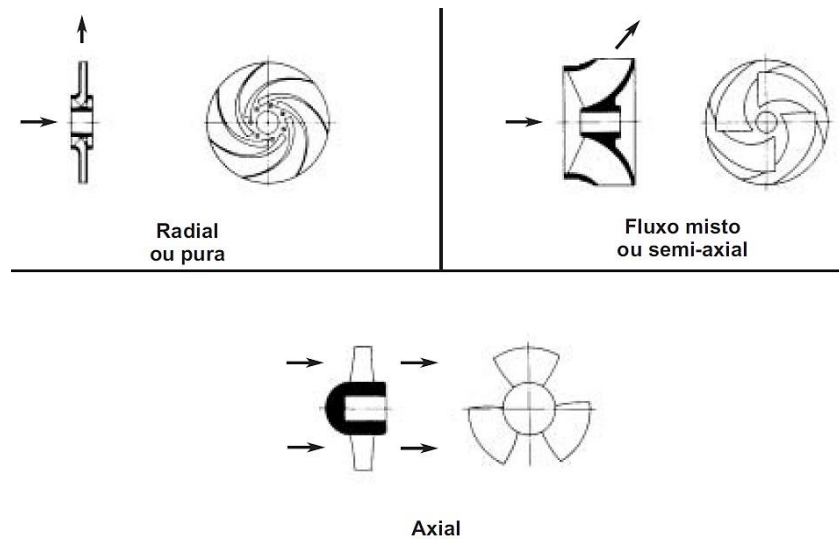


Figura 3.6 – Tipos de rotores das bombas centrífugas. (SILVA *et al.*, 2003)

Os principais componentes de uma bomba centrífuga estão apresentados na figura 3.7 (MEDEIROS FILHO *et al.*, 2009).

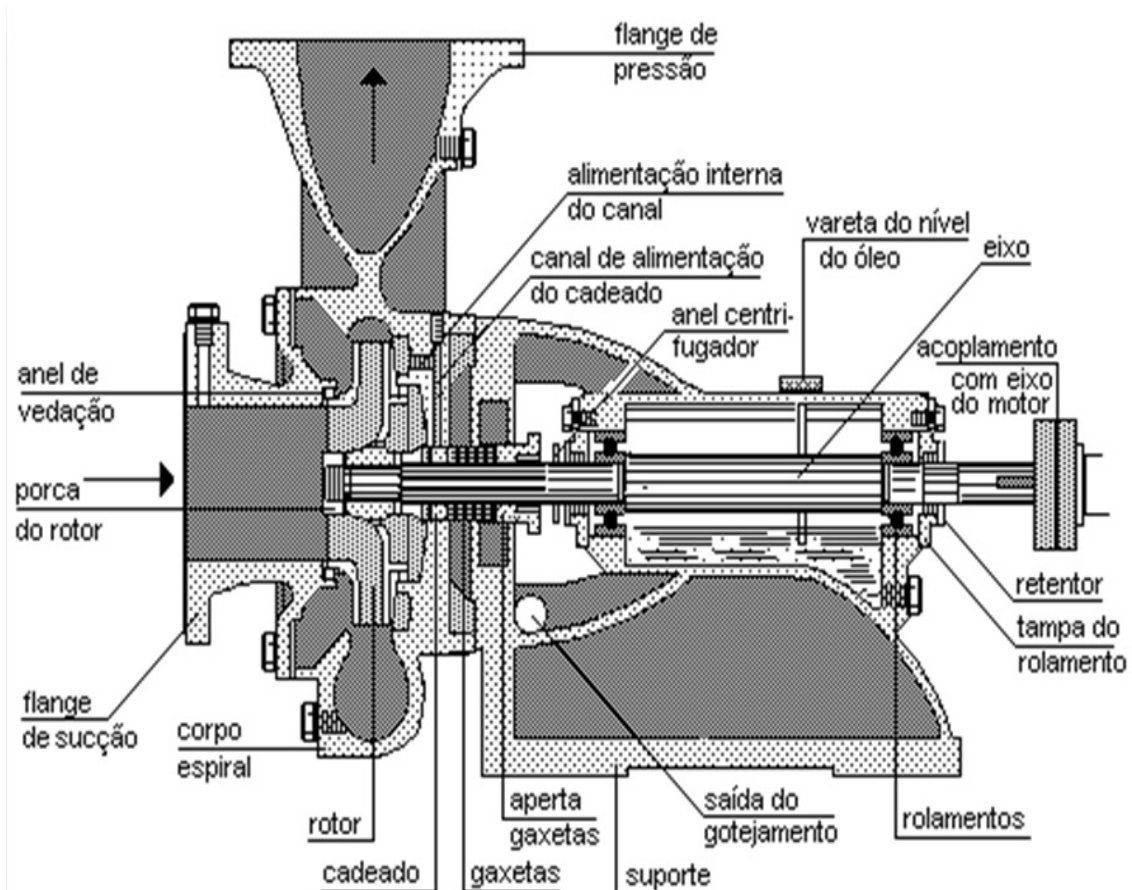


Figura 3.7 – Principais componentes de uma bomba centrífuga. (MEDEIROS FILHO *et al.*, 2009)

### 3.2.3 – Potência Hidráulica da Bomba

A potência hidráulica de uma bomba é definida pela taxa de energia mecânica recebida pela corrente do fluido em escoamento, e pode ser calculada pela equação 3.1.

$$P_h = \rho_a Q g H \quad (3.1)$$

onde:

- $P_h$  – potência hidráulica da bomba (W);
- $\rho_a$  – massa específica do fluido ( $\text{kg/m}^3$ );
- $Q$  – vazão do fluido ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $g$  – aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );
- $H$  – altura manométrica total (m).

A eficiência da bomba, que reflete o quanto de potência mecânica é fornecida ao seu eixo pelo motor elétrico, é calculada pela equação 3.2.

$$\eta_B = \frac{P_h}{P_m} \quad (3.2)$$

onde:

$\eta_B$  – eficiência da bomba;

$P_m$  – potência mecânica fornecida ao eixo da bomba (W).

O rendimento global de uma bomba divide-se em:

- Rendimento Hidráulico: Leva em consideração o acabamento interno superficial do rotor e da carcaça da bomba. Varia também de acordo com o tamanho da bomba, entre 20 e 90%;
- Rendimento Volumétrico: Leva em consideração os vazamentos externos pelas vedações (gaxetas) e a recirculação interna da bomba. Bombas autoaspirantes, injetoras e de alta pressão possuem rendimento volumétrico e global inferior às convencionais;
- Rendimento Mecânico: Leva em consideração que apenas uma parte da potência necessária ao acionamento de uma bomba é usada para bombear, e o restante é perdido por atrito.

Substituindo-se a equação 3.1 na equação 3.2, tem-se a potência mecânica fornecida ao eixo da bomba pelo motor elétrico, dada pela equação 3.3.

$$P_m = \frac{\rho_a QgH}{\eta_B} \quad (3.3)$$

Como o motor elétrico acoplado à bomba possui uma eficiência  $\eta_{el}$ , o rendimento total do conjunto motobomba pode ser encontrado pela equação 3.4.

$$\eta_{MB} = \eta_B \cdot \eta_{el} \quad (3.4)$$

onde:

$\eta_{el}$  – rendimento do motor elétrico acoplado à bomba;

$\eta_{MB}$  – rendimento do conjunto motobomba.

Portanto, a potência elétrica requerida pelo conjunto motobomba, e que deve ser fornecida pela rede elétrica, pode ser obtida pela equação 3.5 (FERREIRA, 2006).

$$P_{el} = \frac{\rho_a QgH}{\eta_{MB}} \quad (3.5)$$

onde:

$P_{el}$  – potência elétrica fornecida pela rede elétrica à motobomba (W).

O valor do rendimento do conjunto motobomba pode ser obtido por meio das curvas características das bombas, geralmente obtidas através de métodos experimentais em bancadas de testes de bombeamento de água, mostrando o desempenho da bomba, e que são fornecidas pelos fabricantes. Um exemplo dessas curvas é mostrado na figura 3.8 (ZANON, 2007).

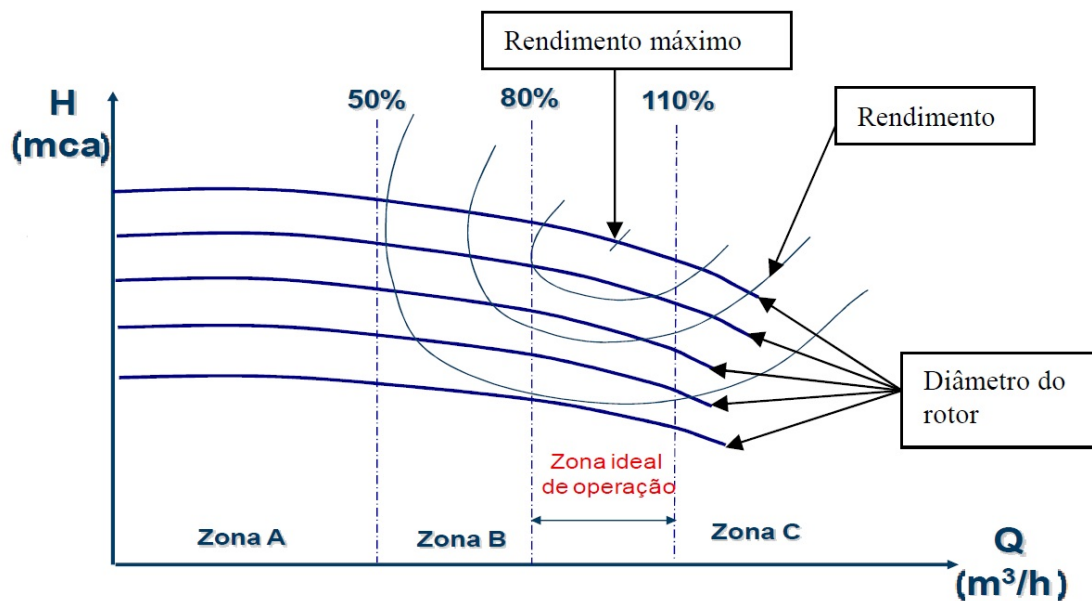


Figura 3.8 – Exemplo de curvas de uma bomba fornecidas pelo fabricante. (ZANON, 2007)

A escolha da bomba deve ser feita de modo que o ponto de projeto do sistema fique o mais próximo possível do rendimento máximo da curva. Quanto maior o rendimento da bomba, menos energia ela gastará para realizar o bombeamento; isto é, em se tratando de um motor elétrico que aciona a bomba, menor será o consumo de energia elétrica.

O gráfico mostra quatro zonas de operação, sendo que a vazão de projeto deve estar na zona ideal de operação, que é uma faixa entre 80% e 110% da vazão de maior rendimento. As outras são a Zona A que é onde se tem o menor rendimento e não deve ser utilizada. A Zona B que é considerada aceitável, e a Zona C, onde pode ocorrer uma sobrecarga do sistema, ou seja, o motor consome energia além do necessário para realizar o trabalho, sendo boa parte dessa energia desperdiçada na forma de calor.

### 3.3 – Inversor de Frequência

O inversor ou conversor de frequência é um equipamento elétrico capaz de produzir uma variação dos valores da frequência elétrica que alimenta o motor, produzindo uma variação da sua rotação ou velocidade angular (TSUTIYA, 2004).

Esses equipamentos são desenvolvidos para trabalhar com motores em corrente alternada (ca), pois, conforme se observa na equação 3.6, ao se variar a frequência de alimentação, a velocidade de rotação, considerando que o número de polos seja fixo, varia na mesma proporção.

$$N = 120 \frac{f}{p} \quad (3.6)$$

onde:

- $N$  – velocidade de rotação (rpm);
- $f$  – frequência de alimentação (Hz);
- $p$  – número de polos.

Apesar de cada fabricante utilizar sua própria tecnologia, o diagrama de blocos ilustrado na figura 3.9 descreve grande parte dos inversores encontrados atualmente no mercado (BRITO, 2006).

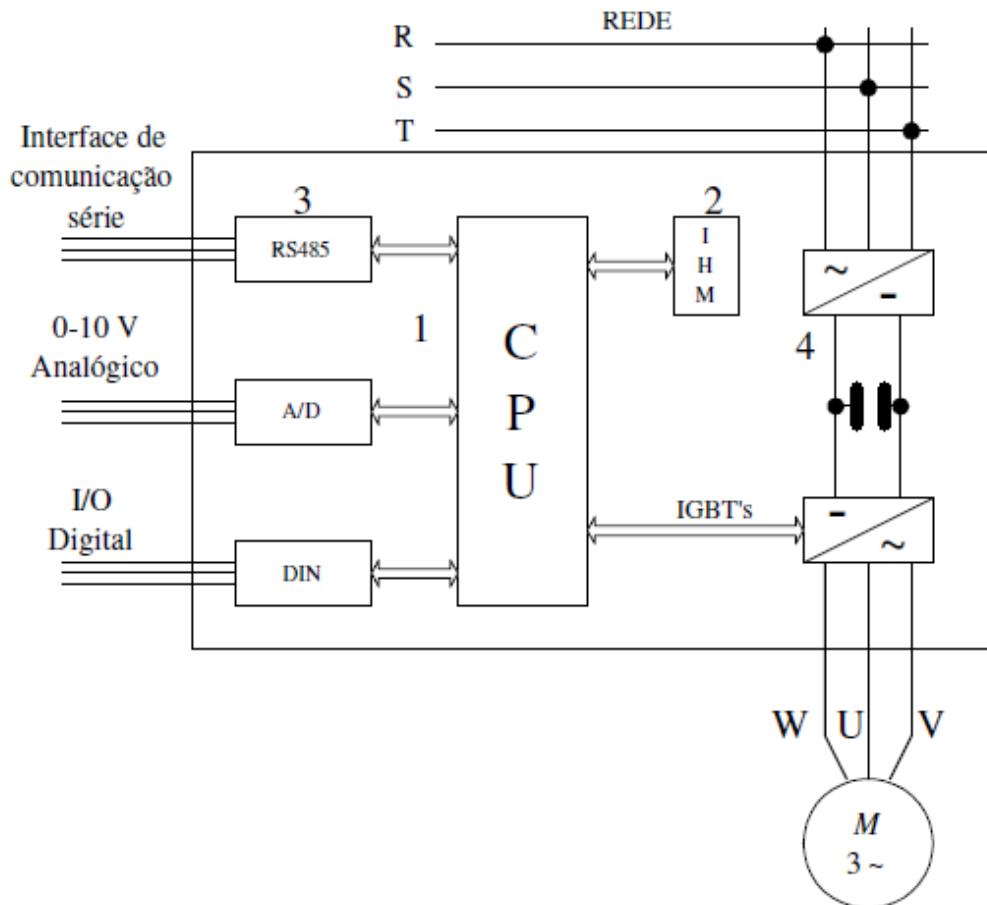


Figura 3.9 – Descrição de um inversor de frequência. (BRITO, 2006)

Os inversores são classificados em quatro blocos, como descrito a seguir (CAPELLI, 2002).

- 1º bloco – CPU (UCP - unidade central de processamento) – é formada por um microprocessador ou um CLP (Controlador Lógico Programável). Neste bloco todos os parâmetros e dados do sistema são armazenados. Executa ainda funções vitais como: geração de pulsos de disparo dos IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), alterando o sentido da corrente que circula no motor.
- 2º bloco – IHM (interface homem-máquina) – este dispositivo permite visualizar de que forma o inversor está parametrizado e, se necessário, ser alterado.
- 3º bloco – Interfaces – o comando pode ser analógico ou digital. Normalmente, para controle da velocidade de rotação utiliza-se tensão analógica (situada entre 0 e 10  $V_{cc}$ ), sendo a velocidade proporcional ao seu valor.

- 4º bloco – Etapa de Potência - é constituída por um circuito retificador, que alimenta o módulo IGBT, através de um barramento de corrente contínua (cc).

Para a aplicação proposta, somente os inversores de frequência que possuam um controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) embarcado são apropriados. Geralmente, os inversores de frequência de 220 V<sub>ac</sub> já vêm com o controlador PID; entretanto, no caso dos inversores de 127 V<sub>ac</sub>, é necessário que um controlador PID seja desenvolvido.

Com a utilização do PID é possível controlar diversas variáveis do sistema, como vazão, nível, temperatura ou pressão, comparando-as com valores de referência desejados. Com isso, é produzido um sinal de saída que atua sobre o processo, no sentido de diminuir a diferença entre o valor lido e o desejado. O algoritmo de um controlador PID consegue obter erro nulo em regime (WEG, 2011).

É importante observar que a operação do inversor de frequência é restrita a uma determinada faixa de tensão.

### 3.3.1 – Características

O acoplamento do inversor a um conjunto motobomba proporciona um controle da velocidade de rotação do motor elétrico acionado por corrente alternada (ca). Com a alteração da rotação, observada as leis de semelhança física das máquinas hidráulicas rotativas (equações 3.6 a 3.9), as curvas de funcionamento da bomba (altura manométrica x vazão, etc) são alteradas, mudando assim o ponto de operação do sistema.

$$\frac{Q_1}{N_1} = \frac{Q_2}{N_2} \quad \text{Relação vazão x rotação} \quad (3.6)$$

$$\frac{P_1}{N_1^3} = \frac{P_2}{N_2^3} \quad \text{Relação potência x rotação} \quad (3.7)$$

$$\frac{H_1}{N_1^2} = \frac{H_2}{N_2^2} \quad \text{Relação carga x rotação} \quad (3.8)$$

$$\frac{T_1}{N_1^2} = \frac{T_2}{N_2^2} \quad \text{Relação torque x rotação} \quad (3.9)$$

É importante ressaltar que os novos pontos encontrados são pontos homólogos, ou seja, operam com mesmo rendimento dos pontos que lhes deram origem.

Existem dois tipos de inversores de frequência: o escalar e o vetorial. A diferença entre eles está basicamente na curva torque x rotação, que no inversor escalar, por ser uma função de V/F (tensão/frequência), não oferece altos torques em baixas rotações, já que o torque é função direta da corrente de alimentação. Neste tipo de inversor, a curva V/F pode ser parametrizada.

Em relação ao inversor vetorial, este não possui uma curva parametrizada; na verdade essa curva varia de acordo com a solicitação de torque, pois este tipo de inversor possui circuitos que variam a tensão e a frequência do motor através do controle das correntes de magnetização do rotor.

O inversor escalar é indicado para partidas suaves, operação acima da velocidade nominal do motor, e operação com constantes reversões. Já o inversor vetorial é indicado para torque elevado com baixa rotação, controle preciso de velocidade e torque regulável.

### 3.3.2 – Parâmetros

Existe uma grande quantidade de fabricantes, e uma infinidade de aplicações diferentes para os inversores.

Os terminais identificados como: R, S, e T (ou L1, L2, e L3), referem-se à entrada trifásica da rede elétrica. Para pequenas potências, é comum encontrar inversores com a entrada monofásica (porém, a saída continua sendo trifásica).

Para diferenciar a entrada da rede para a saída do motor, a saída normalmente vem indicada por: U, V e W.

Além dos terminais de alimentação, tem-se também os de comando. Como cada fabricante possui sua própria configuração, para se saber quais



utilizar é necessário consultar o manual do equipamento. De qualquer maneira, os principais terminais são as entradas (analógicas ou digitais), e as saídas (geralmente digitais).

Para que o inversor funcione corretamente, não basta apenas instalá-lo da forma recomendada. É necessário configurá-lo de acordo com as condições de trabalho em que irá operar. Essa tarefa é chamada de parametrização do inversor.

Quanto maior a quantidade de recursos que o inversor oferece, maior o número de parâmetros disponíveis. Existem inversores com tal nível de sofisticação, que o número de parâmetros pode ultrapassar 900 itens configuráveis.

## CAPÍTULO 4

### ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE BOMBEAMENTO DE ÁGUA

#### 4.1 – Metodologia e Resultados

O processo de estimativa de bombeamento de água utilizando um aerogerador de pequeno porte, proposto neste trabalho, inicia-se com a análise do potencial eólico do local onde a instalação do sistema será realizada. Para a simulação, são considerados dados de velocidade de vento reais de uma determinada localidade, com os sensores colocados a 30 m de altura e por um período de 12 meses. O gráfico contendo os valores das médias horárias de velocidade para um dia típico, além do valor da sua velocidade média, estão apresentadas na figura 4.1.

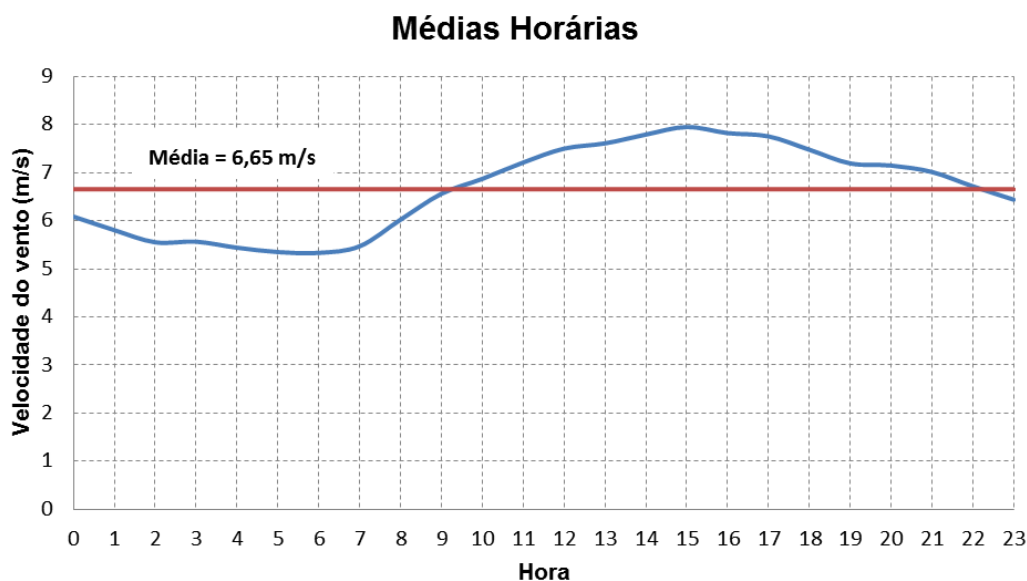


Figura 4.1 – Médias horárias e média diária de velocidade de vento para um dia típico.

Além do gráfico mostrado na figura 4.1, para melhor caracterizar o potencial eólico do local escolhido, faz-se uso do gráfico do histograma de velocidade de vento, mostrado na figura 4.2. O período considerado foi de 12 meses, contemplando todos os 8.760 valores horários de velocidade de vento.

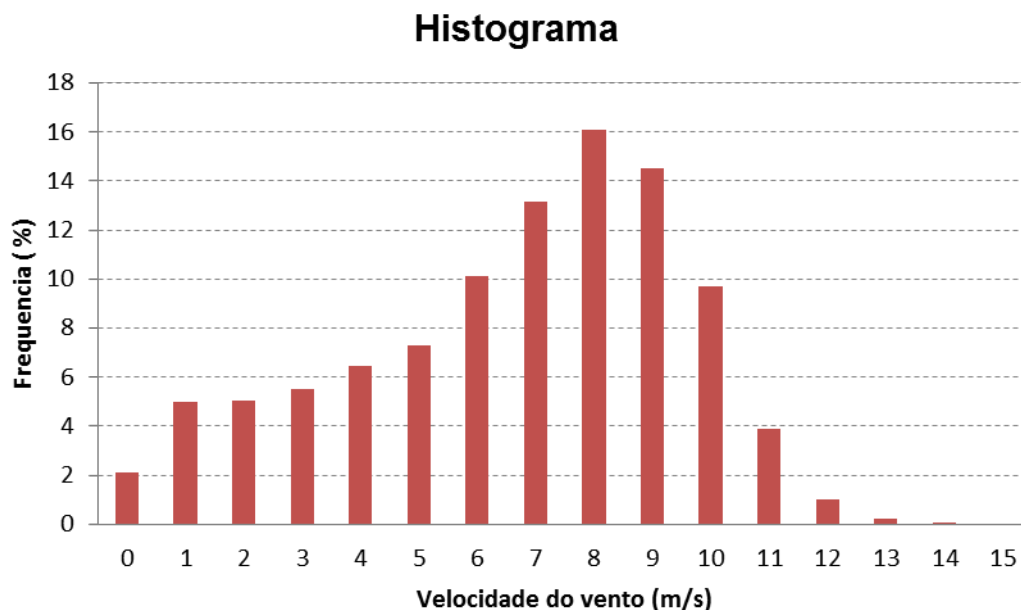


Figura 4.2 – Histograma anual de velocidade de vento.

Existe ainda a possibilidade de se analisar as características do local através de histogramas mensais de velocidade de vento, como, por exemplo, o histograma do mês de agosto, mostrado na figura 4.3.



Figura 4.3 – Histograma de velocidade de vento para o mês de agosto.

Analisando-se os gráficos apresentados, a escolha do local para a instalação do sistema de bombeamento de água utilizando um aerogerador de pequeno porte torna-se perfeitamente viável.

O aerogerador escolhido para a simulação é o Gerar 246, da Enersud, que possui potência nominal de 1 kW. A figura 4.4 apresenta a curva de potência do aerogerador (ENERSUD, 2011), cujos valores são fornecidos pelo fabricante.

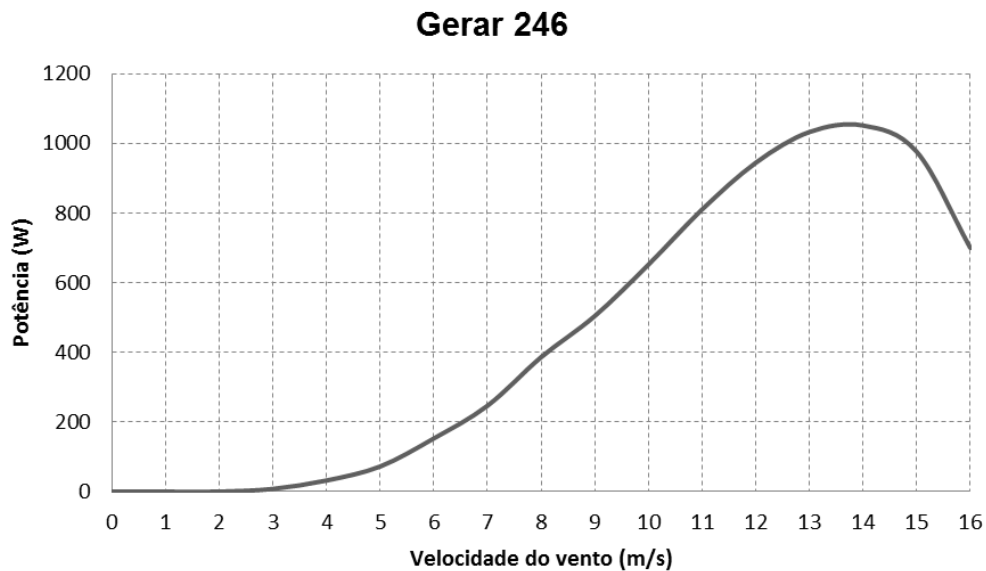


Figura 4.4 – Curva de potência do aerogerador Gerar 246. (ENERSUD, 2010)

Os valores da potência de saída do aerogerador de acordo com a velocidade de vento, constantes no gráfico da curva de potência fornecida pelo fabricante, já contemplam todas as perdas presentes no aerogerador.

De posse dos valores de velocidade de vento, da curva de potência do aerogerador e dos histogramas mensais de velocidade de vento, pode-se determinar a quantidade de energia que pode ser gerada mensalmente, como apresentado na figura 4.5.

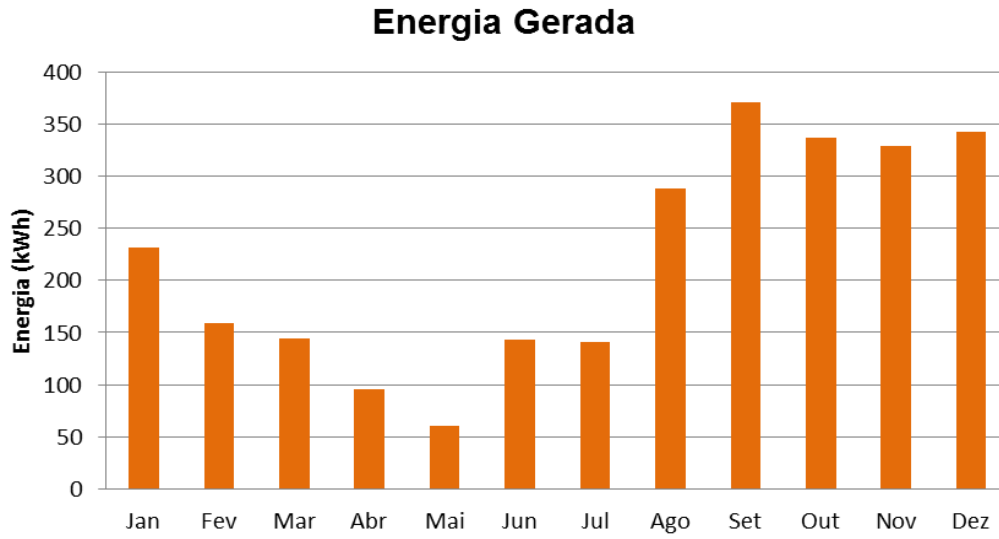


Figura 4.5 – Energia gerada mensalmente pelo aerogerador.

Com a conexão do aerogerador ao inversor, a princípio, devem-se considerar as perdas no inversor, acrescentando o fator  $\eta_{inv}$ , que é a eficiência do inversor, à equação da potência a ser entregue ao conjunto motobomba, antes dada pela equação 3.5, e que pode agora ser calculada pela equação 4.1.

$$P_{el} = \frac{\rho_a QgH}{\eta_{mb}\eta_{inv}} \quad (4.1)$$

A equação da vazão de bombeamento a partir de um aerogerador pode ser obtida escrevendo a equação 4.1 de outra maneira, resultando na equação 4.2.

$$Q = \eta_{mb}\eta_{inv} \frac{P_{el}}{\rho_a gH} \quad (4.2)$$

onde a vazão é expressa em  $m^3/s$ .

Para a simulação, as vazões são estimadas em  $m^3/h$  e, com isso, a equação 4.2 sofre uma modificação, resultando na equação 4.3.

$$Q = 3600\eta_{mb}\eta_{inv} \frac{P_{el}}{\rho_a gH} \quad (4.3)$$

As bombas centrífugas possuem rendimentos que variam normalmente de 0,45 a 0,75 e, em alguns casos, como em bombas de grandes dimensões, atingem um rendimento de 0,85 (JACUZZI, 2010).

Os inversores de frequência possuem um rendimento elevado, sendo em média de 0,95 (WEG, 2011).

O primeiro método a ser implementado é com os valores da potência elétrica fornecida pelo aerogerador sendo aplicados na equação 4.3 e considerando valores para a eficiência do conjunto motobomba de 45% e para o inversor de 95%. O gráfico da vazão média mensal de bombeamento estimada para o modelo BMSAF404/0,5-7 de 0,5 CV, fabricante SOMAR, considerando três alturas manométricas, é mostrado na figura 4.6.

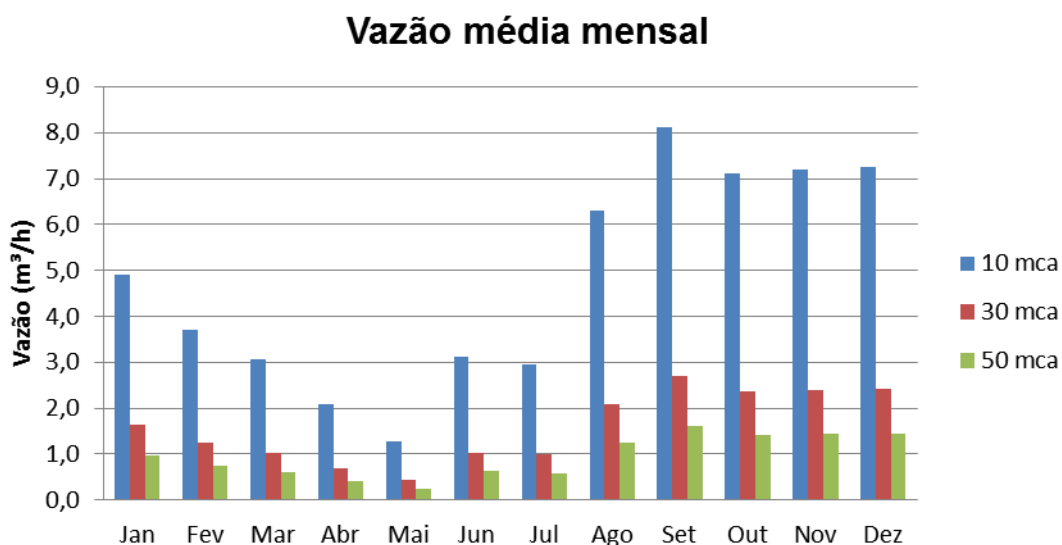


Figura 4.6 – Vazão de bombeamento estimada utilizando o método teórico.

O segundo método tem como fonte os dados obtidos em uma bancada de ensaio de bombeamento (ZILLES *et al.*,2005), onde são fornecidos os valores de vazão para uma motobomba centrífuga acoplada a um inversor de frequência, considerando as mesmas alturas manométricas da simulação anterior (figura 4.6), com a finalidade de obter sua curva de capacidade instantânea, e cujo resultado é apresentado no gráfico da figura 4.7.

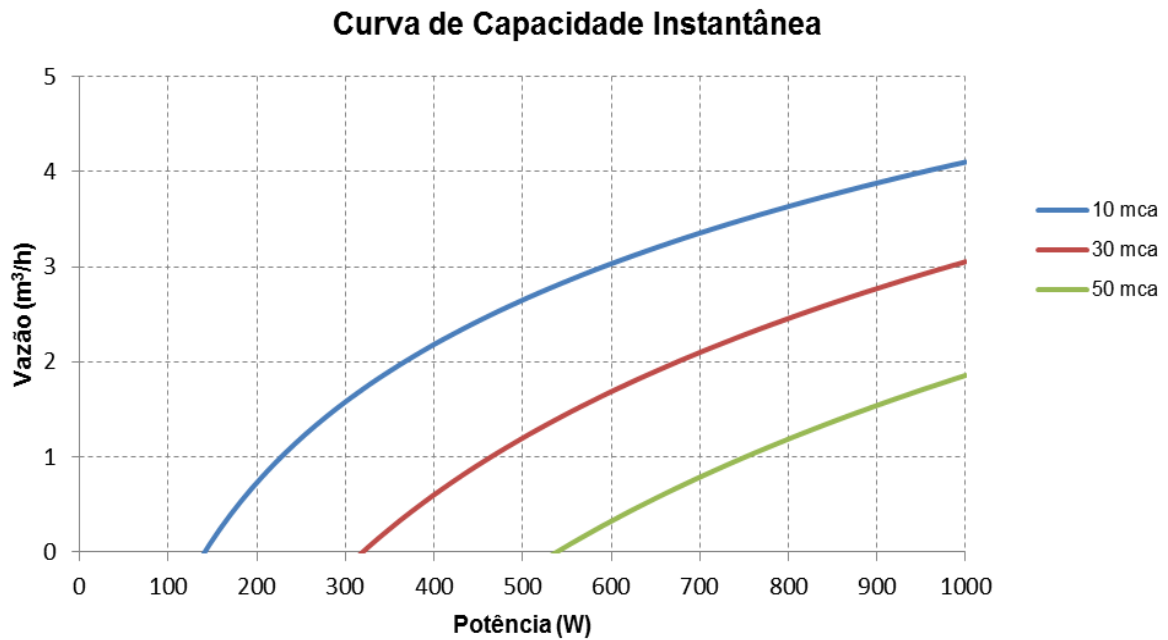


Figura 4.7 – Curva de capacidade instantânea levantada experimentalmente. (ZILLES *et al.*,2005)

A bomba utilizada no ensaio foi o modelo BMSAF404/0,5-7 de 0,5 CV, fabricante SOMAR, e o inversor foi o modelo CFW08 Plus, da WEG. As potências mínimas necessárias para que a bomba iniciasse o bombeamento foram de 140,88 W; 319,17 W e 538,12 W, para as alturas manométricas de 10 mca, 30 mca e 50 mca, respectivamente, confirmando assim as características de funcionamento do inversor.

Com os valores encontrados, obtêm-se as equações 4.4, 4.5 e 4.6, que se referem, respectivamente, às alturas manométricas de 10, 30 e 50 mca.

$$Q = 2,0932 \ln(P_{el}) - 10,357 \quad (4.4)$$

$$Q = 2,6746 \ln(P_{el}) - 15,421 \quad (4.5)$$

$$Q = 3,0006 \ln(P_{el}) - 18,868 \quad (4.6)$$

onde:

$Q$  – vazão do fluido (m<sup>3</sup>/h);

$P_{el}$  – potência elétrica fornecida à bomba centrífuga (W).

Observa-se que a vazão pode ser calculada, de uma forma geral, pela equação 4.7.

$$Q = a \ln(P_{el}) - b \quad (4.7)$$

onde **a** e **b** são os coeficientes cujos valores variam com a altura manométrica.

Assim, de posse das três alturas manométricas e dos respectivos valores de **a** e **b** podem-se utilizar métodos de ajuste de curvas para que seja possível obter valores de vazões para alturas manométricas diferentes.

O ajuste polinomial pode ser dado pela equação 4.8 (SANCHES, 2007), na sua forma geral.

$$\varphi(x) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 x^2 + \dots + \alpha_{n+1} x^n \quad (4.8)$$

A forma matricial para se encontrar um conjunto de funções a serem aplicadas no ajuste polinomial é dado na equação 4.9.

$$\begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^n \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i^3 & \sum_{i=1}^m x_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{n+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n & \sum_{i=1}^m x_i^{n+1} & \sum_{i=1}^m x_i^{n+2} & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{2n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m f(x_i) \\ \sum_{i=1}^m x_i f(x_i) \\ \sum_{i=1}^m x_i^2 f(x_i) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^m x_i^n f(x_i) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

onde:

$m$  – número de pontos do gráfico;

$n$  – maior grau do polinômio de ajuste.

Assim, para as curvas  $axH$  e  $bxH$ , têm-se os pontos conhecidos  $(a_1, H_1)$ ,  $(a_2, H_2)$ ,  $(a_3, H_3)$  e  $(b_1, H_1)$ ,  $(b_2, H_2)$ ,  $(b_3, H_3)$ , respectivamente.

Os valores de  $x$  são dados pelas alturas  $H_1$ ,  $H_2$  e  $H_3$ , enquanto que os valores de  $f(x)$  são os coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  para o cálculo de **a**, e  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  para o cálculo de **b**.

As curvas de ajuste para os coeficientes **a** e **b** em função da altura **H** são dadas pelas equações 4.10 e 4.11.

$$a(H) = \alpha_1 + \alpha_2 H + \alpha_3 H^2 \quad (4.10)$$

$$b(H) = \beta_1 + \beta_2 H + \beta_3 H^2 \quad (4.11)$$



Para se encontrar os valores de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ , bem como os de  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $\beta_3$ , resolvem-se as equações 4.12 e 4.13.

$$\begin{bmatrix} 3 & \sum_{i=1}^3 H_i & \sum_{i=1}^3 H_i^2 \\ \sum_{i=1}^3 H_i & \sum_{i=1}^3 H_i^2 & \sum_{i=1}^3 H_i^3 \\ \sum_{i=1}^3 H_i^2 & \sum_{i=1}^3 H_i^3 & \sum_{i=1}^3 H_i^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 a_i \\ \sum_{i=1}^3 H_i a_i \\ \sum_{i=1}^3 H_i^2 a_i \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} 3 & \sum_{i=1}^3 H_i & \sum_{i=1}^3 H_i^2 \\ \sum_{i=1}^3 H_i & \sum_{i=1}^3 H_i^2 & \sum_{i=1}^3 H_i^3 \\ \sum_{i=1}^3 H_i^2 & \sum_{i=1}^3 H_i^3 & \sum_{i=1}^3 H_i^4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^3 b_i \\ \sum_{i=1}^3 H_i b_i \\ \sum_{i=1}^3 H_i^2 b_i \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Com a solução das equações 4.12 e 4.13 é possível estimar a vazão da bomba selecionada para alturas manométricas diversas.

Para a simulação, são consideradas as equações da curva de capacidade instantânea (figura 4.7) e da potência fornecida pelo aerogerador, obtendo-se um novo gráfico para a vazão de bombeamento nas três alturas manométricas citadas, cujo resultado é apresentado na figura 4.8.

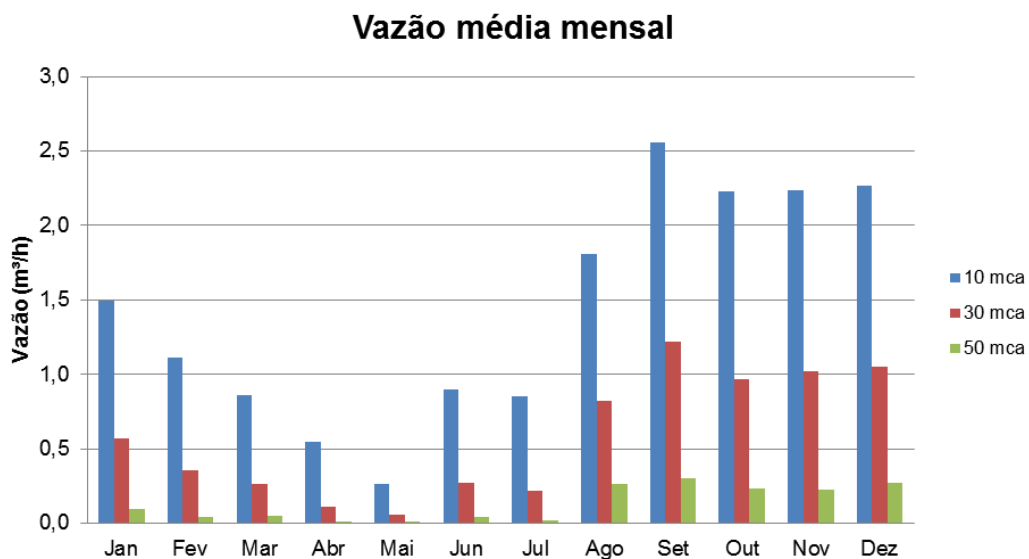


Figura 4.8 – Vazão de bombeamento estimada utilizando dados experimentais.

Observa-se que os valores de vazão do gráfico mostrado na figura 4.6 apresentam diferenças significativas se comparados aos da figura 4.8. Isto se deve ao fato de que nem toda a potência fornecida pelo aerogerador é entregue à bomba, pois o inversor de frequência trabalha em uma determinada faixa de tensões, e para determinados valores de potência a tensão necessária para que o inversor funcione não é suficiente.

Portanto, para valores abaixo ou acima dessa faixa de operação não há energia suficiente para o bombeamento.

As figuras 4.9, 4.10 e 4.11 mostram as diferenças dos valores de vazão obtidos pelos dois métodos nas três alturas manométricas consideradas.

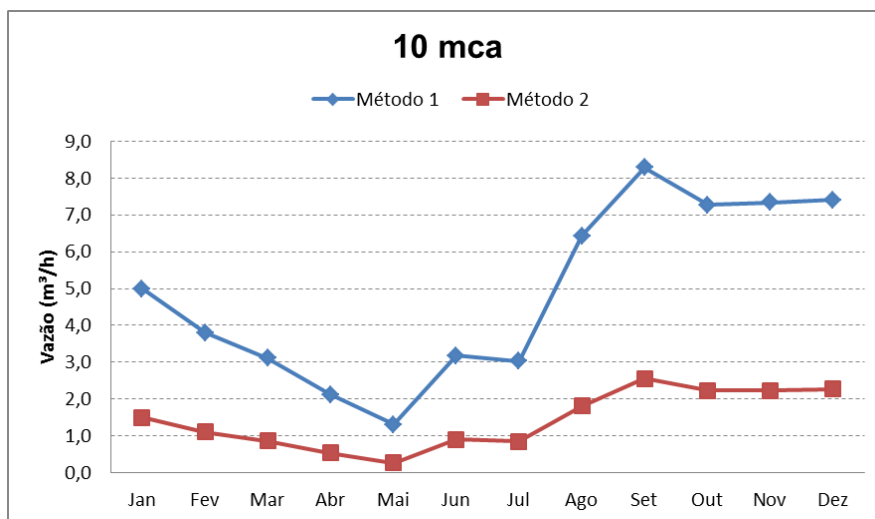


Figura 4.9 – Comparação entre os valores de vazão para 10 mca.

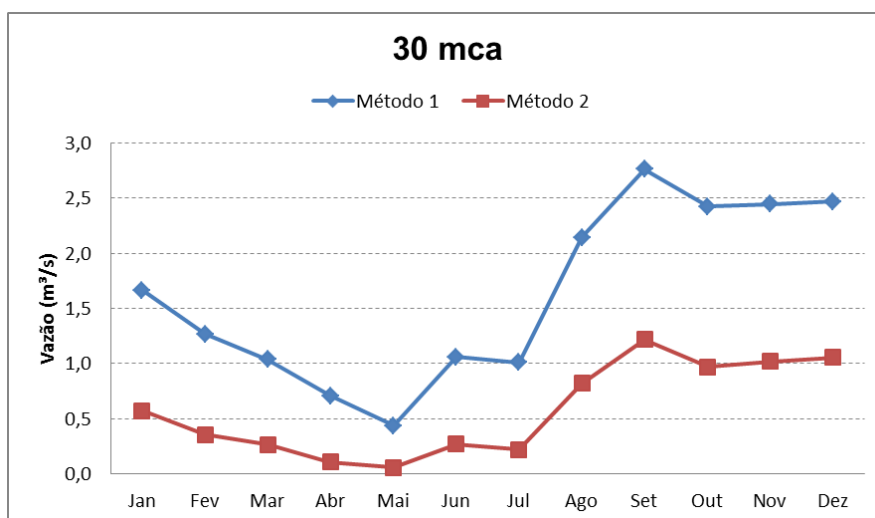


Figura 4.10 – Comparação entre os valores de vazão para 30 mca.

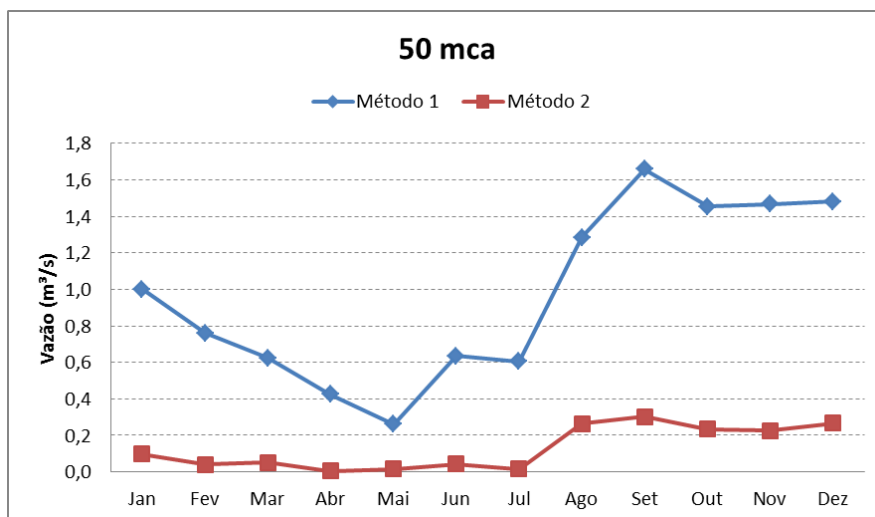


Figura 4.11 – Comparação entre os valores de vazão para 50 mca.

Comparando-se os resultados obtidos pelos dois métodos, teórico e experimental, verifica-se uma diferença significativa entre os valores de vazão média mensal obtidos, confirmando que existem perdas não consideradas pelo método teórico.

Portanto, quando se deseja uma análise de potencial de bombeamento de água de uma forma mais criteriosa, devem-se utilizar os dados de motobombas encontrados experimentalmente.

Com base nos valores do gráfico da figura 4.8, calculou-se o volume médio diário de água bombeado para cada mês, com as respectivas alturas manométricas, estando os resultados apresentados na figura 4.12.

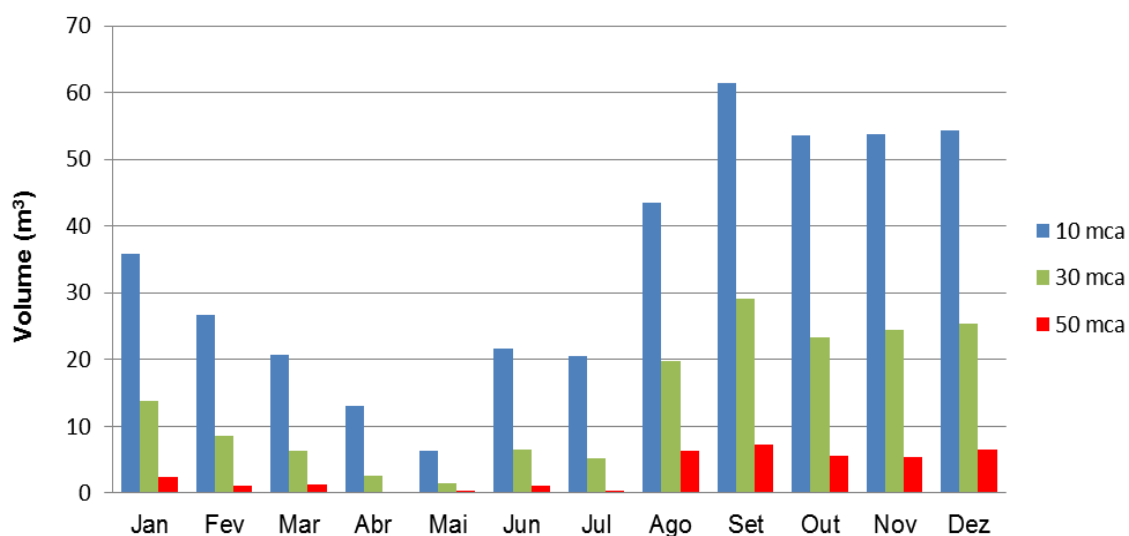


Figura 4.12 – Volume diário de bombeamento estimado para o local.

Com a obtenção dos valores estimados para a vazão e o volume de água bombeado pelo sistema, pode-se então analisar a possibilidade de atendimento à comunidade do local escolhido.

Conforme recomendações da Organização Mundial de Saúde (OMS), a quantidade ótima de água consumida diariamente por pessoa deve ser de 100 litros, para atender as necessidades de consumo (preparação de alimentos e hidratação) e higiene (WHO, 2003). Considerando que uma família tenha em média 5 pessoas, a figura 4.13 apresenta a quantidade de famílias que o sistema pode atender.

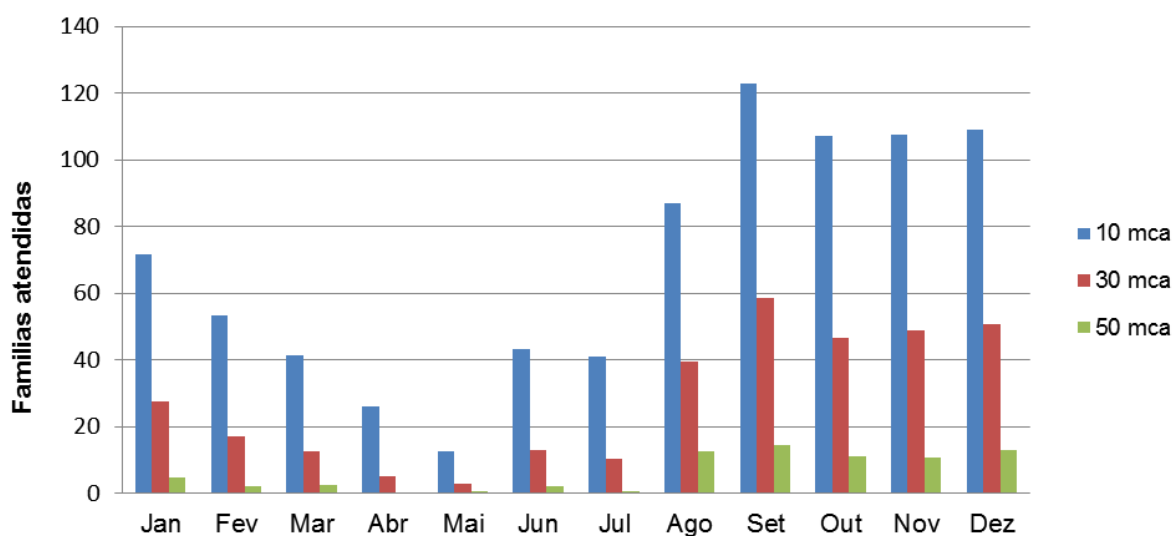


Figura 4.13 – Número estimado de famílias que podem ser atendidas.

Vale ressaltar que um sistema de armazenamento de água deve ser providenciado, pois, além do vento ser intermitente, nas situações de escassez de vento, a quantidade mínima para atender as necessidades da comunidade deve ser disponibilizada.

Este exemplo tem apenas a finalidade de demonstrar a utilização da metodologia proposta, pois no programa computacional apresentado posteriormente, o usuário tem condições de realizar outras simulações, com base em dados de vento reais.

## 4.2 – Ferramenta Computacional (Programa AERBOM)

A ferramenta computacional que serve de auxílio na análise do potencial de bombeamento de água para um determinado local foi construída em linguagem de programação Delphi®, e recebeu o nome de AERBOM.

Para a simulação, podem ser implementados no programa ambos os modelos apresentados no item 4.1. Assim, podem-se calcular os valores de vazão para outras alturas manométricas, utilizando-se somente os modelos de bomba e inversor fornecidos pelo banco de dados.

O fluxograma padrão do programa está na figura 4.14.

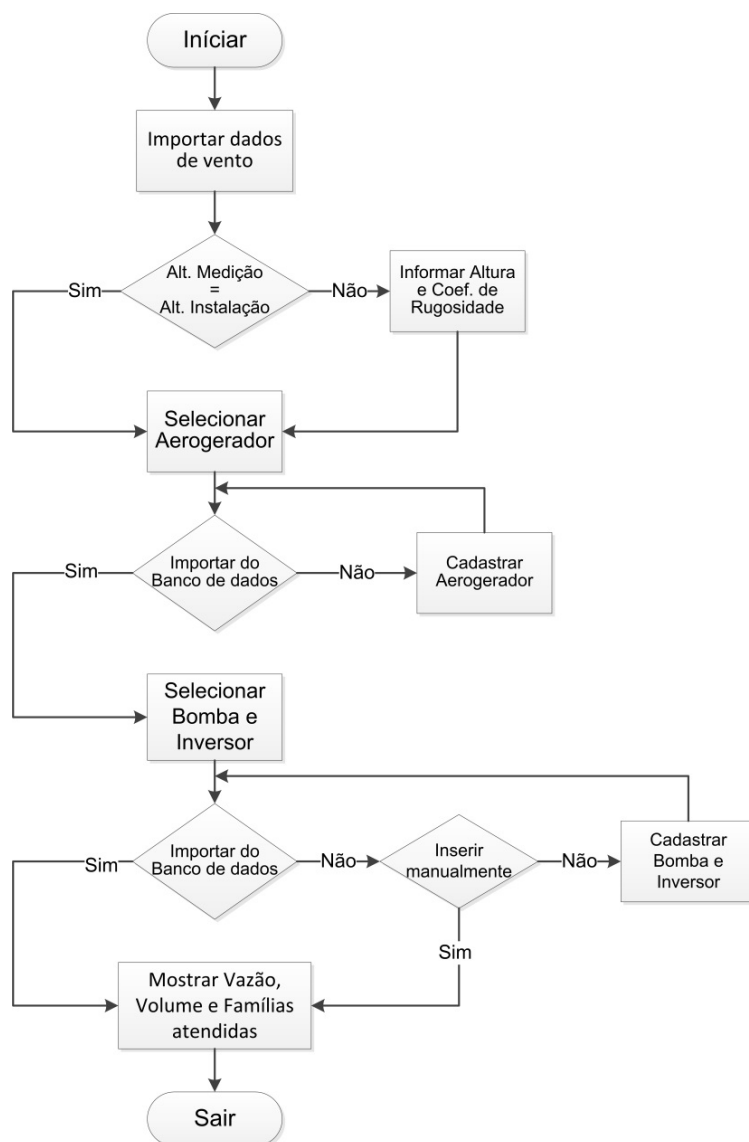


Figura 4.14 – Fluxograma padrão do programa AERBOM.

Caso haja a necessidade de se inserir dados de outros modelos de motobomba, isso poderá ser feito atualizando o banco de dados que acompanha o programa.

A tela inicial do programa está mostrada na figura 4.15.

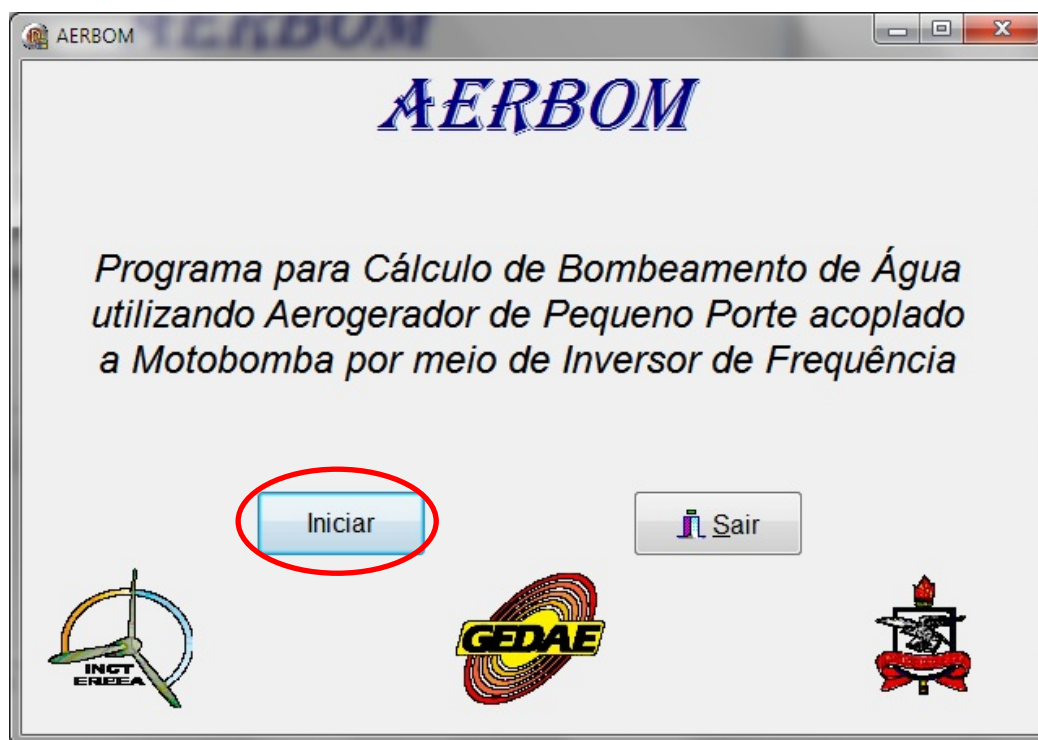


Figura 4.15 – Tela inicial do programa AERBOM.

Para iniciar o programa basta acionar o botão “*Iniciar*”, em destaque na figura 4.15, que outra tela se abrirá, na janela principal, para que sejam selecionados os dados de vento, como mostra a figura 4.16.

The screenshot shows the AERBOM software interface. The window title is 'AERBOM'. The active tab is 'Dados de Vento'. The interface includes the following elements:

- Importar dados de arquivo:** A text input field for the file path, a 'Procurar' button, and an 'Importar' button.
- Altura das medições:** A text input field.
- Localidade:** A text input field.
- Deseja uma altura diferente?:** Radio buttons for 'Sim' and 'Não'.
- Nova altura (m):** A text input field.
- Coeficiente de rugosidade\*:** A text input field.
- \* Consultar** and **Confirmar** buttons.
- Velocidade Média (m/s):** A table with 12 rows (months) and 1 column of input fields.
- Gráficos**, **Salvar gráficos**, and **Limpar** buttons.
- Two empty coordinate systems:** The top one has a vertical axis 'Velocidade do vento (m/s)' and a horizontal axis '0'. The bottom one has a vertical axis 'Frequência (%)' and a horizontal axis 'Velocidade do vento (m/s)'.

Figura 4.16 – Tela para seleção de dados de vento.

Na tela mostrada na figura 4.16, ao pressionar primeiro o botão “Procurar”, o usuário pode localizar o arquivo com extensão .txt que contém os dados de vento, que devem estar posicionados em coluna única, com a primeira linha contendo o nome da localidade, a segunda o valor da altura de medição e as demais com os 8.760 valores horários de velocidade de vento. Após encontrar e selecionar o arquivo pressiona-se o botão “Importar” para que os dados sejam carregados, sendo apresentadas a altura da medição e a localidade, em destaque na figura 4.17.

The screenshot shows the AERBOM software interface with the following elements:

- Windows Title Bar:** AERBOM
- Tabs:** Dados de Vento, Aerogerador, Bomba e Inversor, Cálculo da Vazão
- File Path:** C:\Aerbom\Dados de vento\D: with a "Procurar" button.
- Importation:** "Importar" button.
- Height Selection:** "Deseja uma altura diferente?" with radio buttons for "Sim" and "Não". Below are input fields for "Nova altura (m):" and "Coeficiente de rugosidade\*:" with "\* Consultar" and "Confirmar" buttons.
- Data Table:** A table with columns for months (Janeiro to Dezembro) and "Velocidade Média (m/s)".
- Actions:** "Gráficos", "Salvar gráficos", and "Limpar" buttons.
- Graphs:** Two empty coordinate systems. The top one has a vertical axis labeled "Velocidade do vento (m/s)" and a horizontal axis labeled "0". The bottom one has a vertical axis labeled "Frequência (%)" and a horizontal axis labeled "Velocidade do vento (m/s)".
- Red Oval:** Highlights the "Altura das medições: 30 m" and "Localidade: Mota" fields.

Figura 4.17 – Dados de vento importados de arquivo .txt para o programa.

Ainda na tela mostrada na figura 4.17, se a altura da instalação do aerogerador for diferente, basta selecionar a opção “Sim”, caso contrário, seleciona-se a opção “Não” referente à pergunta “Deseja uma altura diferente?”, como mostra a figura 4.18.



The screenshot shows the AERBOM software interface with the 'Aerogerador' tab selected. The 'Dados de Vento' section includes a file path 'C:\Aerbom\Dados de vento\D:' and a 'Procurar' button. The 'Altura das medições' is set to '30 m' and 'Localidade' is 'Mota'. The 'Deseja uma altura diferente?' section has two radio buttons: 'Sim' (selected and circled in red) and 'Não'. Below this are fields for 'Nova altura (m):' and 'Coeficiente de rugosidade\*:' with a '\* Consultar' button. A table for 'Velocidade Média (m/s)' lists months from Janeiro to Dezembro. To the right are buttons for 'Gráficos', 'Salvar gráficos', and 'Limpar'. Two empty graphs are shown: the top one for 'Velocidade do vento (m/s)' and the bottom one for 'Frequência (%)', both with '0' on the x-axis.

Figura 4.18 – Instalação do aerogerador na mesma altura da medição.

Com a opção de uma altura diferente, é necessário informar a nova altura e o valor do coeficiente de rugosidade (Coeficiente de Hellmann). Caso esse valor não seja conhecido, pressiona-se o botão “Consultar”, para ter acesso a uma lista contendo os tipos de cobertura do solo, mostrada na figura 4.19, onde cada cobertura possui um valor correspondente para o coeficiente de rugosidade.

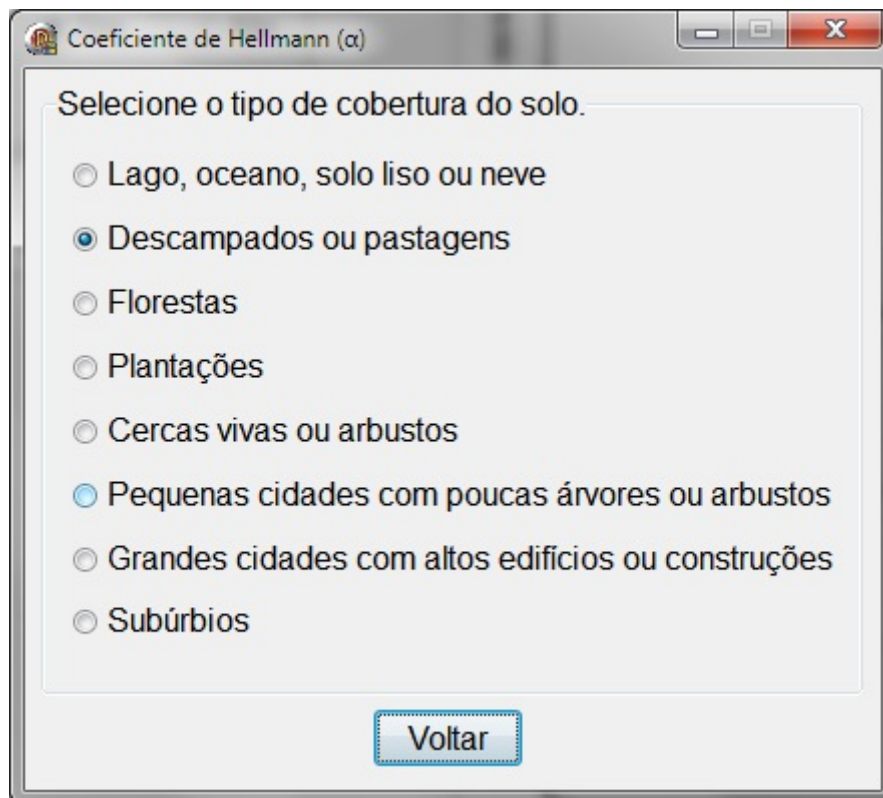


Figura 4.19 – Tipos de cobertura que possuem valores tabelados do coeficiente de rugosidade.

Após selecionar o tipo de cobertura do solo adequado ao local de instalação (figura 4.19), pressiona-se o botão “*Voltar*”, para retornar à tela anterior, que preenche automaticamente o valor correspondente do coeficiente de rugosidade do local escolhido, como apresenta a figura 4.20.

The screenshot shows the AERBOM software interface with the following elements:

- Windows:** "Dados de Vento", "Aerogerador", "Bomba e Inversor", "Cálculo da Vazão".
- File Path:** "C:\Aerbom\Dados de vento\D:" with a "Procurar" button.
- Height:** "Altura das medições: 30 m".
- Location:** "Localidade: Mota".
- Importation:** "Importar dados de arquivo" and "Importar" button.
- Options:** "Deseja uma altura diferente?" with radio buttons for "Sim" (selected) and "Não".
- Height Input:** "Nova altura (m): 15".
- Roughness Coefficient:** "Coeficiente de rugosidade\*: 0,13" (circled in red).
- Buttons:** "\* Consultar" and "Confirmar".
- Velocity Table:**

	Velocidade Média (m/s)
Janeiro	<input type="text"/>
Fevereiro	<input type="text"/>
Março	<input type="text"/>
Abril	<input type="text"/>
Maio	<input type="text"/>
Junho	<input type="text"/>
Julho	<input type="text"/>
Agosto	<input type="text"/>
Setembro	<input type="text"/>
Outubro	<input type="text"/>
Novembro	<input type="text"/>
Dezembro	<input type="text"/>
- Buttons:** "Gráficos", "Salvar gráficos", "Limpar".
- Graphs:** Two empty coordinate systems. The top one has "Velocidade do vento (m/s)" on the y-axis and "0" on the x-axis. The bottom one has "Frequência (%)" on the y-axis and "Velocidade do vento (m/s)" on the x-axis.

Figura 4.20 – Coeficiente de rugosidade correspondente ao tipo de cobertura do solo.

Com os valores da altura e do coeficiente de rugosidade, basta pressionar o botão “*Confirmar*” para prosseguir com a simulação. Os valores de velocidade de vento para a altura desejada são calculados automaticamente pelo programa através da equação 2.1.

Para o exemplo considerado neste trabalho, é usada a opção “*Não*” da figura 4.18, para em seguida pressionar o botão “*Confirmar*”, sendo o resultado mostrado na figura 4.21, onde estarão apresentados os valores de velocidade média do vento para cada um dos meses do ano, além da habilitação do botão “*Gráficos*”.

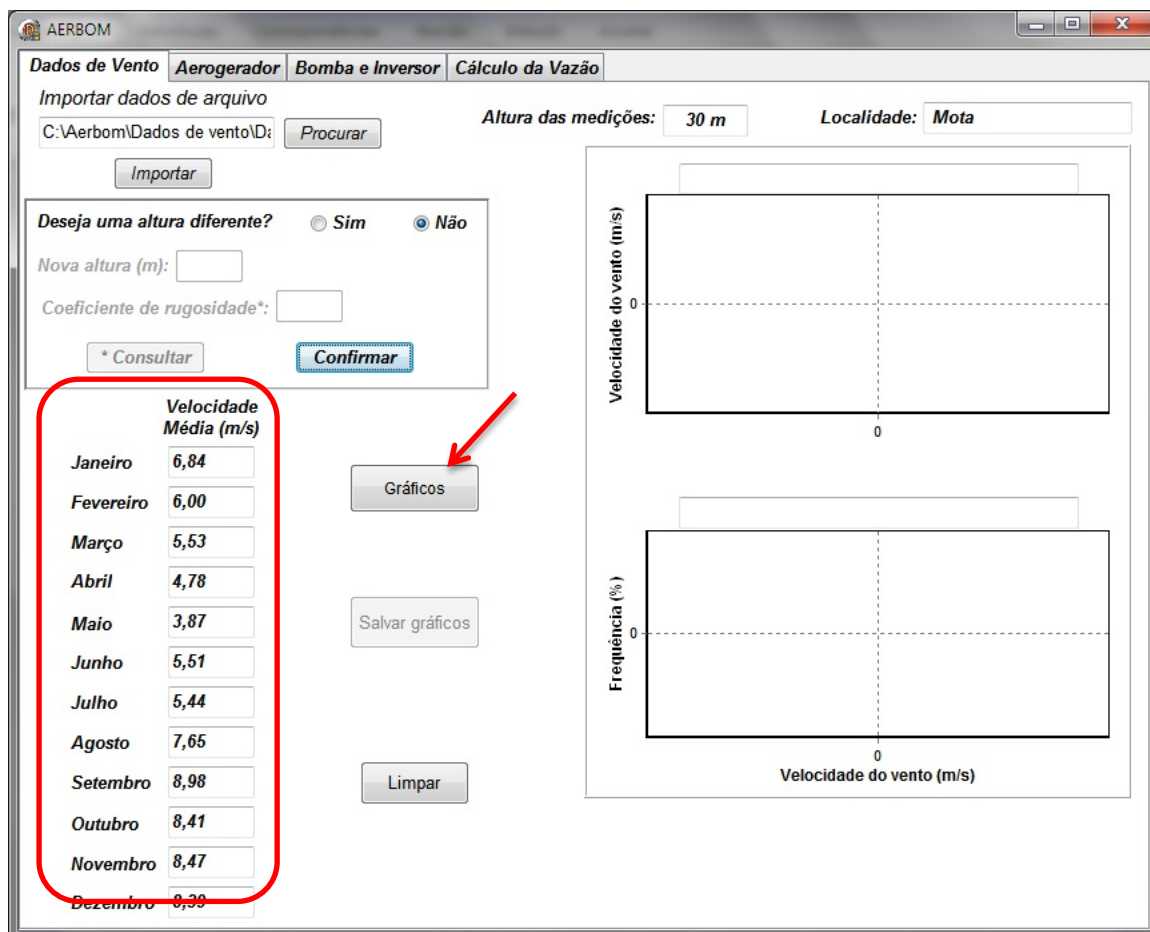


Figura 4.21 – Valores de velocidade média do vento para cada mês do ano.

Pressionando-se o botão “Gráficos” (figura 4.21), são apresentados os gráficos da velocidade média mensal do vento, da velocidade média anual e o histograma anual das velocidades de vento, como mostrado na figura 4.22.

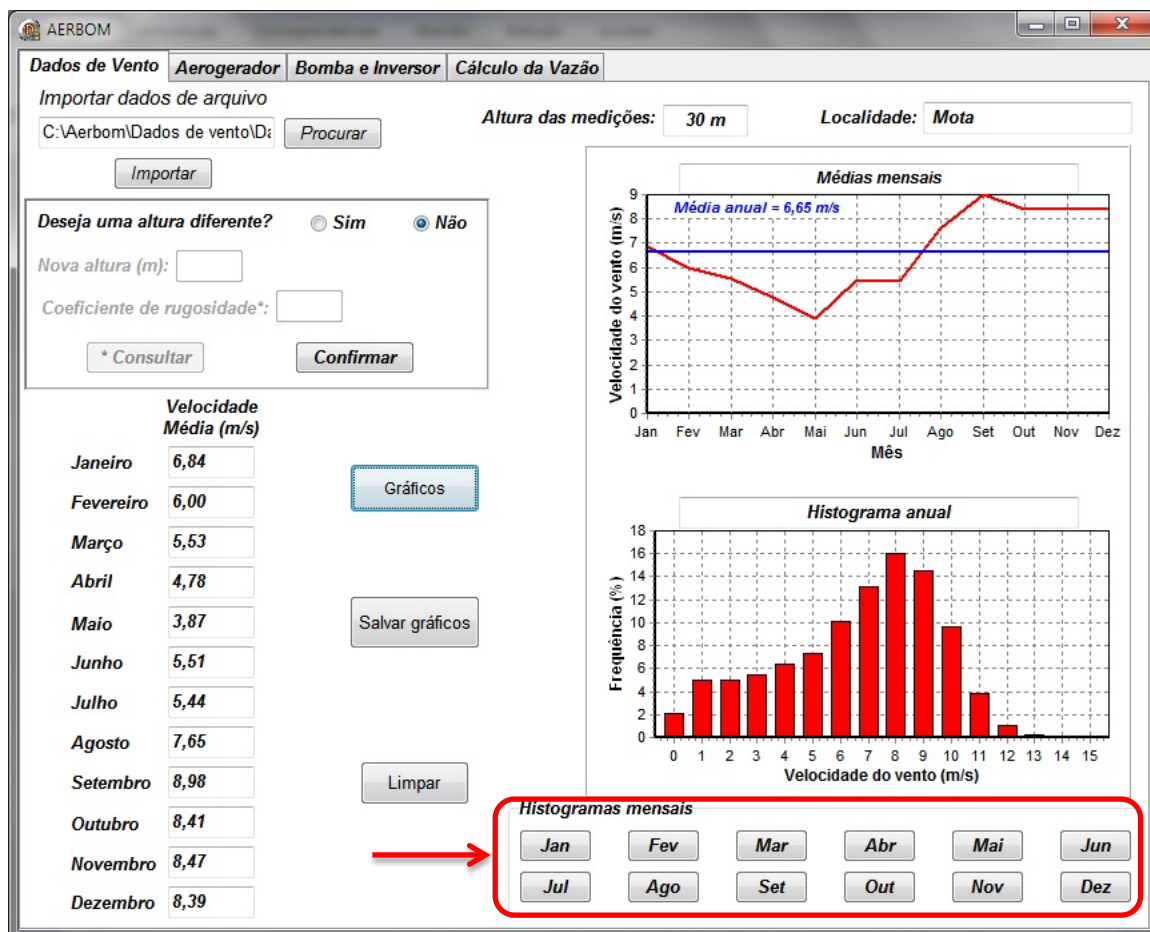


Figura 4.22 – Valores e gráficos referentes às velocidades de vento do local.

Os histogramas mensais da velocidade de vento, as velocidades médias para um dia típico do mês e a velocidade média do mês selecionado também podem ser visualizados, bastando para isso pressionar o mês desejado (em destaque na figura 4.22). Para exemplificar este procedimento, selecionou-se o mês de agosto, cujo resultado é apresentado na figura 4.23.

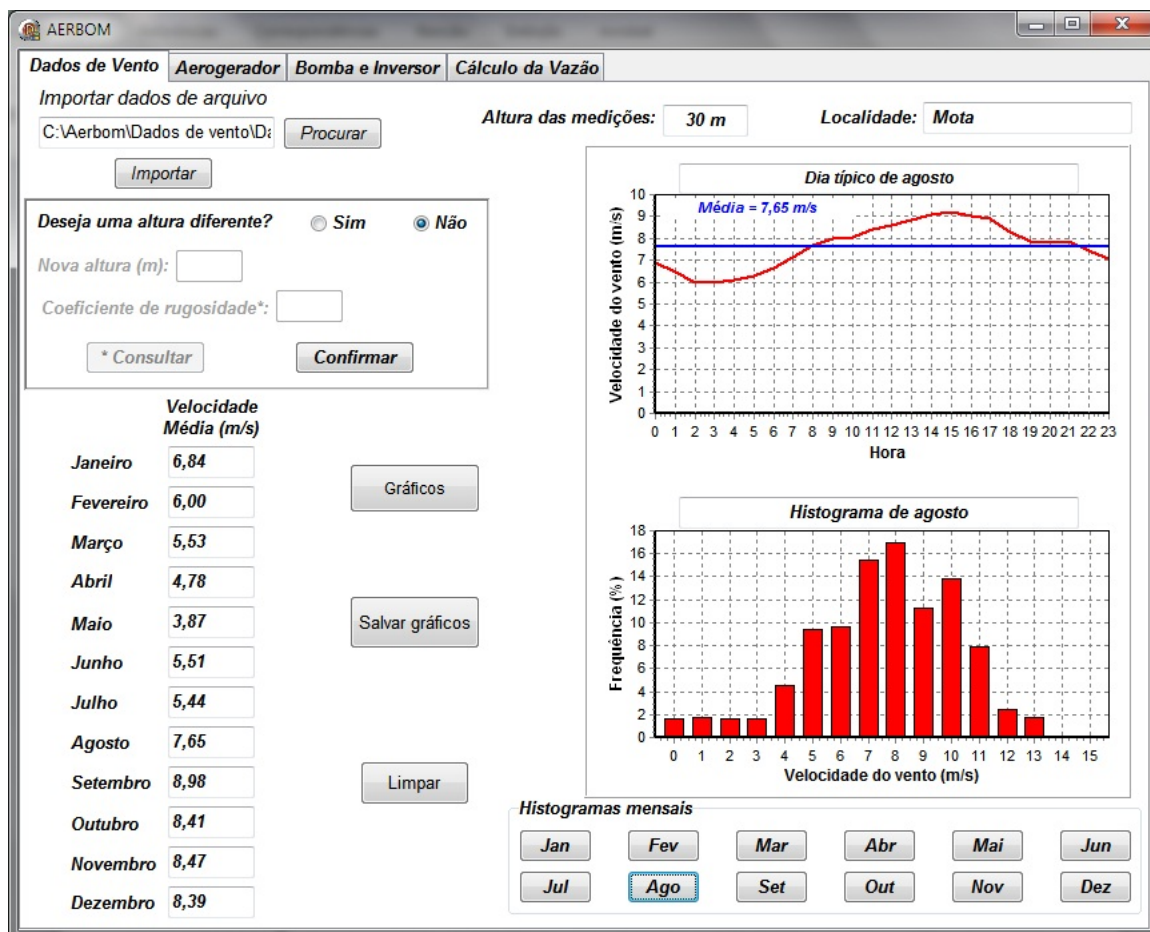


Figura 4.23 – Gráficos correspondentes ao mês de agosto.

Os gráficos podem ser armazenados como figuras com extensão *.bmp*, bastando para isso pressionar o botão “*Salvar gráficos*” e escolher o nome do arquivo e o local onde será armazenada a figura.

Com os dados de vento já carregados, seleciona-se a aba “*Aerogerador*”, com a finalidade de carregar os dados do aerogerador a ser utilizado.

Os dados são selecionados diretamente do banco de dados de informações de aerogeradores de pequeno porte que acompanha o programa, ao pressionar o botão “*Importar dados*”, a seleção do aerogerador é habilitada (em destaque na figura 4.24). Para o exemplo, foi selecionado o aerogerador Gerar 246 diretamente do banco de dados.

**Dados do Aerogerador**

Modelo: **Gerar246**

Pot. Nominal (kW): 
 Vel. Nominal (m/s): 
 Vel. de Partida (m/s): 
 Vel. de Corte (m/s): 
 Fabricante:

Energia Anual Gerada (kWh): 
 Fator de Capacidade (%):

**Valores da Curva de Potência do Aerogerador**

V (m/s)	P (W)
3	8,05
4	32,21
5	72,48
6	153,02
7	246,98
8	386,58
9	504,7
10	652,35
11	810,74
12	944,96
13	1033,56
14	1052,35
15	977,18
16	700,67
17	0

**Curva de Potência**

Gráfico de Potência (kW) vs. Velocidade do vento (m/s)

Figura 4.24 – Seleção do aerogerador a ser utilizado na simulação.

Após a seleção do aerogerador, pressiona-se o botão “*Confirmar Dados*”, indicado na figura 4.24, para automaticamente mostrar as informações do aerogerador selecionado, como o gráfico da sua Curva de Potência, além de calcular a energia anual gerada e o fator de capacidade do aerogerador, como apresentado na figura 4.25.

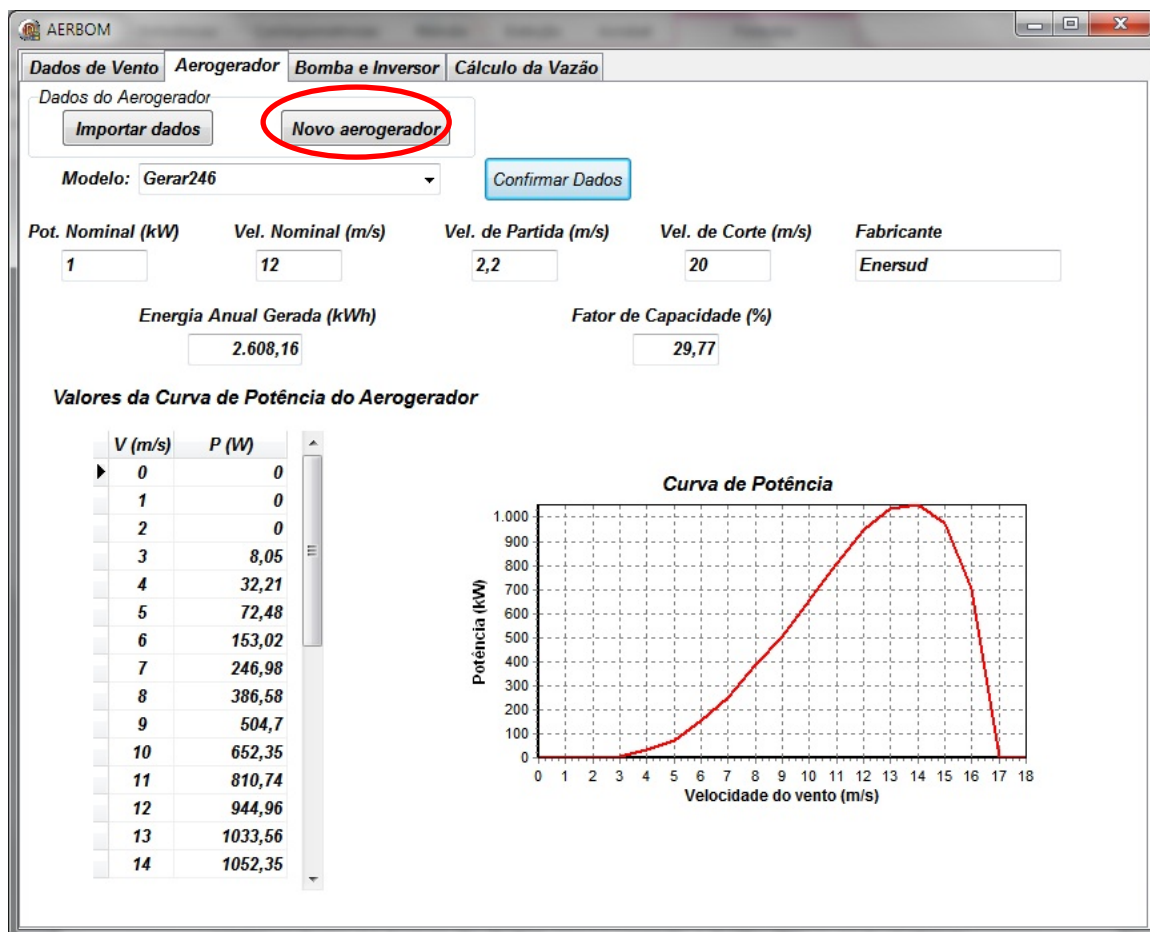


Figura 4.25 – Informações referentes ao aerogerador selecionado.

Existe ainda a possibilidade de se efetuar o cadastro de outros aerogeradores no banco de dados, pressionando o botão “*Novo aerogerador*” (em destaque na figura 4.25) abrirá uma nova tela, mostrada figura 4.26, onde deverão ser inseridos os novos dados. Após a inserção, pressionar o botão “*Fechar*” para retornar à janela principal do programa.



Figura 4.26 – Tela de cadastramento de registros de aerogeradores no banco de dados.

Para o cálculo da potência instantânea fornecida pelo aerogerador, de acordo com a velocidade do vento, o programa implementa a equação 4.14 (KOUTROULIS *et al.*, 2006), onde é necessário conhecer a curva de potência do aerogerador.

$$P_s = P_1 + (v - v_1) \cdot \frac{P_2 - P_1}{v_2 - v_1} \Rightarrow P_2 > P_1 \quad (4.14)$$

onde:

$P_s$  – potência de saída de acordo com a velocidade de vento (W);

$(P_1, v_1)$  e  $(P_2, v_2)$  – são os pares de potência e velocidade do vento de acordo com a curva de potência do aerogerador;

$v$  – velocidade do vento efetivamente verificada (m/s).

O valor da velocidade de vento efetivamente verificada ( $v$ ) deve estar situado entre  $v_1$  e  $v_2$ , para gerar uma potência na saída do aerogerador situada

entre  $P_1$  e  $P_2$ . A precisão do resultado é tão maior quanto menor for o intervalo  $[v_1, v_2]$ .

Após a escolha do aerogerador, seleciona-se a aba “*Bomba e Inversor*”, para selecionar o conjunto motobomba e o inversor. O usuário pode optar por entrar com os valores solicitados de forma manual ou utilizar o banco de dados contendo modelos de bombas centrífugas, com valores da curva de capacidade instantânea obtidas experimentalmente em uma bancada de testes de bombeamento.

Para exemplificar o funcionamento do programa, foi selecionado o conjunto motobomba e inversor do banco de dados. A figura 4.27 apresenta a tela em questão, onde está selecionada a bomba Somar 1/2 cv.

The screenshot shows the 'AERBOM' software window with the 'Bomba e Inversor' tab selected. The interface includes a 'Dados da Bomba e Inversor' section with radio buttons for 'Importar do banco de dados' (selected) and 'Inserir manualmente'. A 'Novo conjunto' button is also present. The 'Bomba' dropdown menu is set to 'SOMAR 1/2 CV'. Below it, the 'Modelo' is 'BMSAF404/0' and the 'Fabricante' is 'SOMAR'. A red-bordered box highlights a warning message: '\*OBS: A altura máxima para o conjunto deve ser menor que 77 mca'. Below this, the user is prompted to 'Informe as alturas manométricas totais:' with input fields for 'H1= (mca)', 'H2= (mca)', and 'H3= (mca)', followed by an 'Ok' button. There are also 'Gerar Curvas' and 'Limpar' buttons. The 'Inversor utilizado' is 'CFW08 Plus' and the 'Fabricante do Inversor' is 'WEG'. At the bottom left, a note states: '\* OBS.: Inversor utilizado na obtenção dos dados da curva de capacidade instantânea da Bomba.'

Figura 4.27 – Seleção da bomba e do inversor.

As alturas manométricas podem ser inseridas pelo usuário, até o limite apresentado em destaque na figura 4.27.

Esse valor máximo para a altura é determinado pelo valor máximo de potência fornecida pelo aerogerador e o mínimo necessário para que o conjunto motobomba e inversor possa realizar o bombeamento.

Para exemplificar o funcionamento do programa, foram selecionadas três alturas manométricas, pressionando o botão “Ok” e acionar também o botão “Gerar Curvas” para se visualizar o gráfico da curva de capacidade da bomba selecionada, como mostra a figura 4.28.

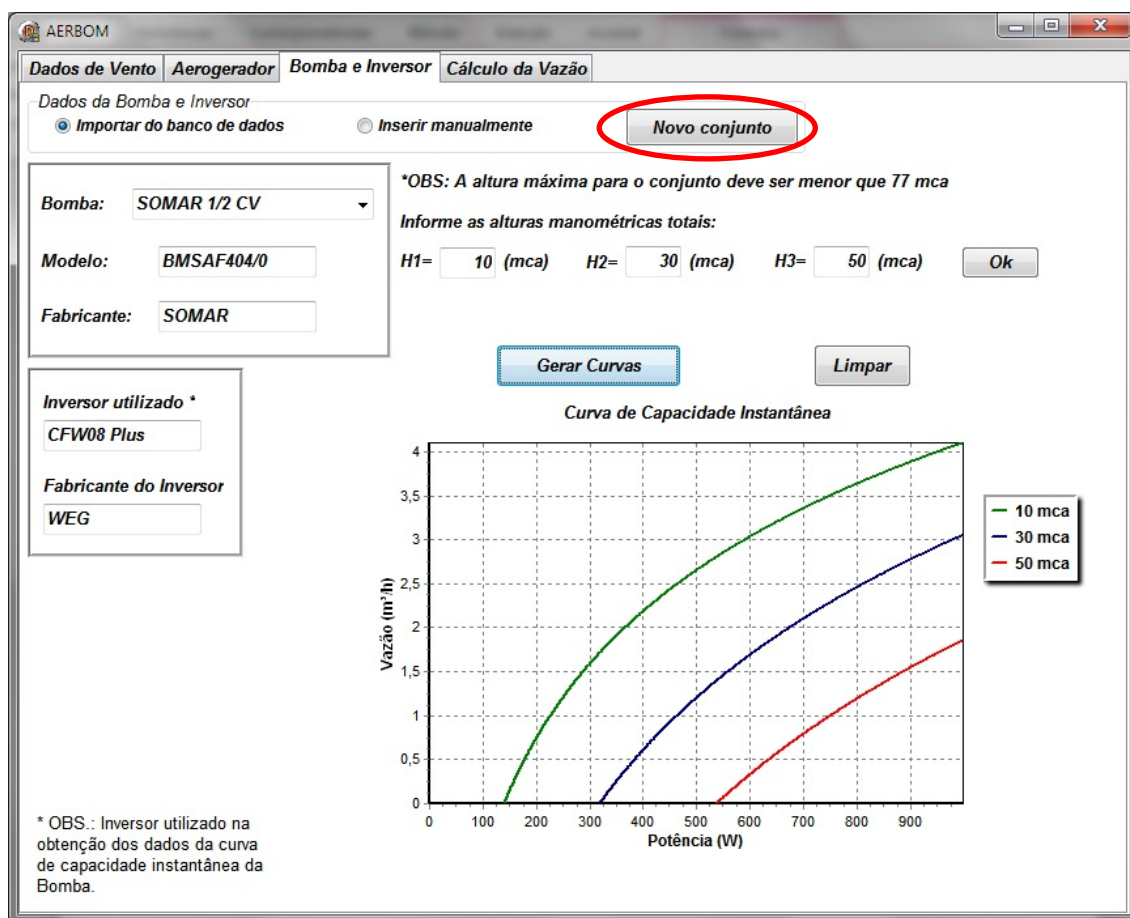


Figura 4.28 – Seleção do conjunto bomba e inversor do banco de dados.

Existe a possibilidade de se cadastrar novos dados de conjuntos motobomba e inversor obtidos em bancada de ensaio de bombeamento, para isso, pressionar o botão “*Novo conjunto*” (destacado na figura 4.28) para abrir a tela mostrada na figura 4.29. Ao final da inserção dos dados, pressionar o botão “*Fechar*” para retornar à janela principal do programa.



The screenshot shows the 'AERBOM' software window with the 'Cálculo da Vazão' tab selected. The interface is organized into three vertical panels, each with a header and a grid of input boxes. The first panel, 'Vazão Média Mensal (m³/h)', has a grid with 12 rows (months) and 3 columns. The second panel, 'Volume Médio Diário (m³)', also has a 12x3 grid. The third panel, 'Famílias Atendidas por Dia \*', has a 12x3 grid. To the left of these grids, the months from 'Janeiro' to 'Dezembro' are listed. Below the grids is a 'Gráficos' section with three buttons: 'Vazão', 'Volume', and 'Famílias'. To the right of this section are 'Salvar' and 'Fechar' buttons. A note at the bottom right reads: '\*OBS.: Cada família é composta de 5 pessoas, e segundo a OMS, cada pessoa deve consumir pelo menos 100 litros de água por dia.'

Figura 4.30 – Tela para apresentação dos resultados de vazão.

À medida que os botões forem sendo pressionados, os valores encontrados nos cálculos são apresentados. As figuras 4.31, 4.32 e 4.33 apresentam, respectivamente, os valores encontrados para a vazão média mensal, o volume médio diário bombeado, e o número de famílias que podem ser atendidas pelo sistema.

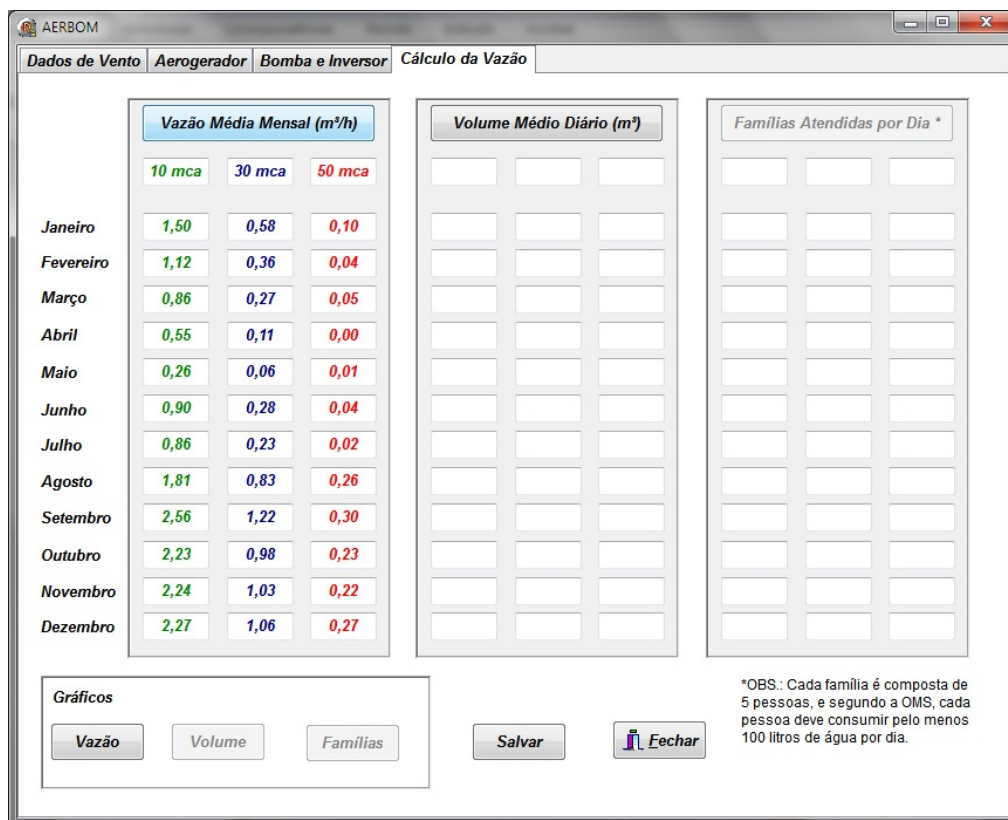


Figura 4.31 – Valores da vazão média mensal de bombeamento.

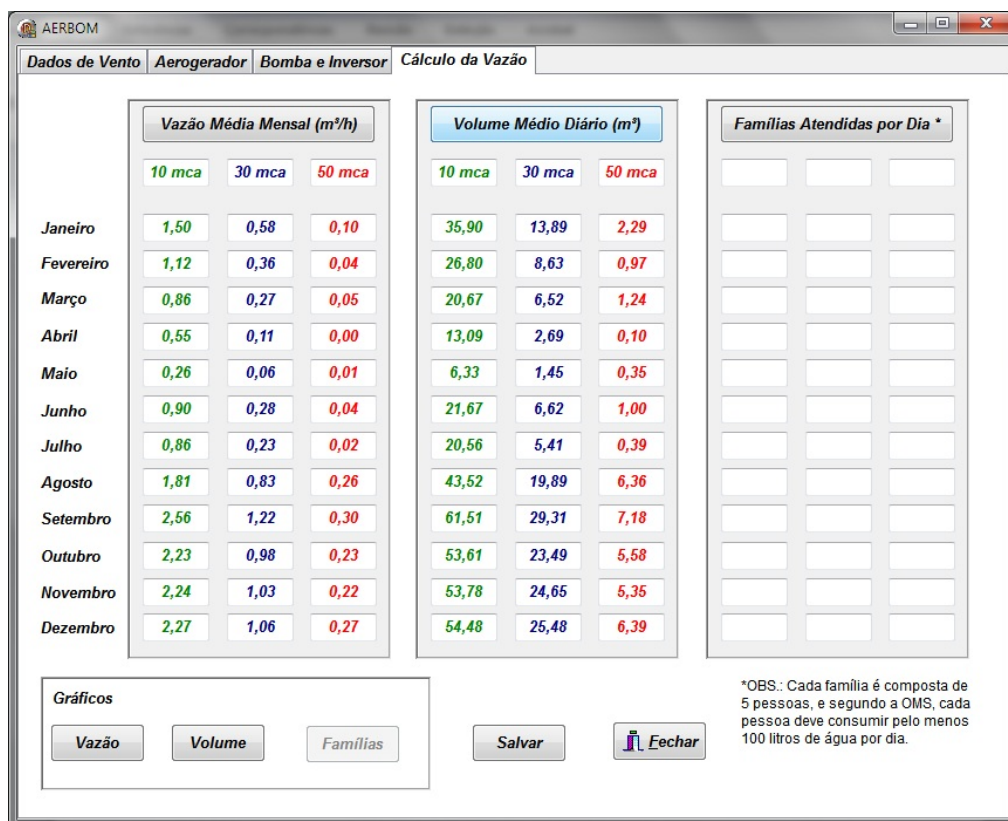


Figura 4.32 – Volume médio diário bombeado mensalmente.

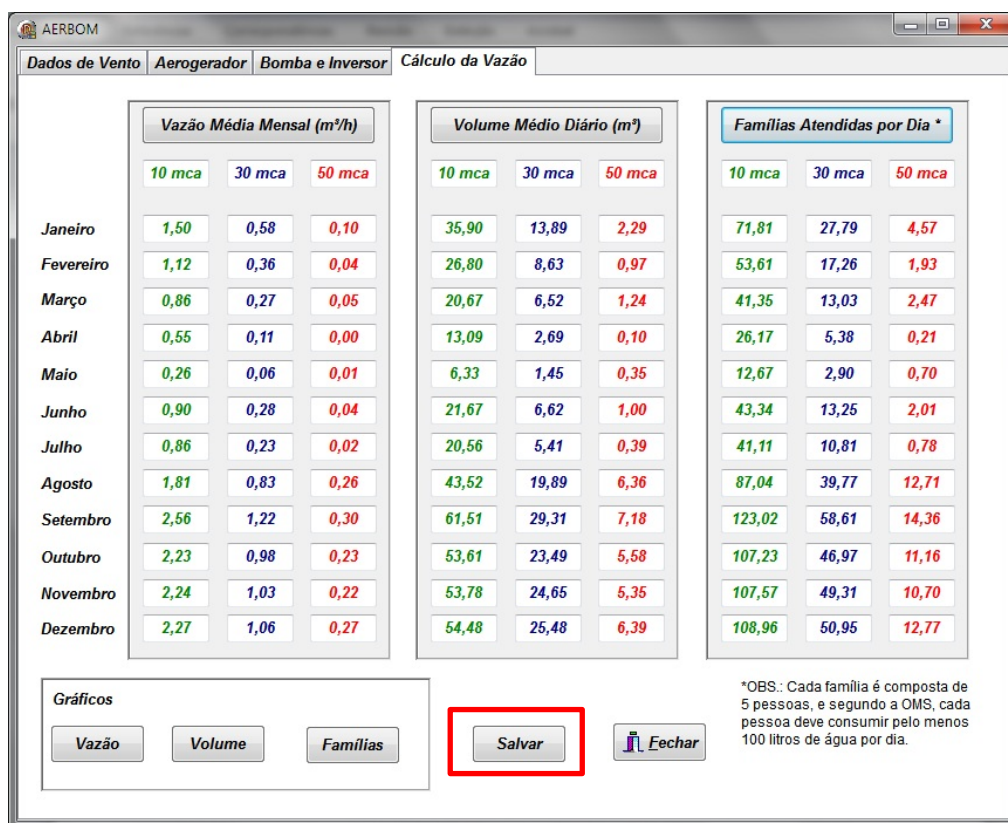


Figura 4.33 – Número de famílias que podem ser atendidas diariamente em média por mês.

O usuário pode armazenar os dados de vazão calculados em uma planilha do Excel®, bastando para isso pressionar o botão “*Salvar*”, em destaque na figura 4.33, armazenando os dados para posterior análise.

Os gráficos representativos dos valores calculados podem ser visualizados pressionando o seu respectivo botão. As figuras 4.34, 4.35 e 4.36 mostram os respectivos gráficos.

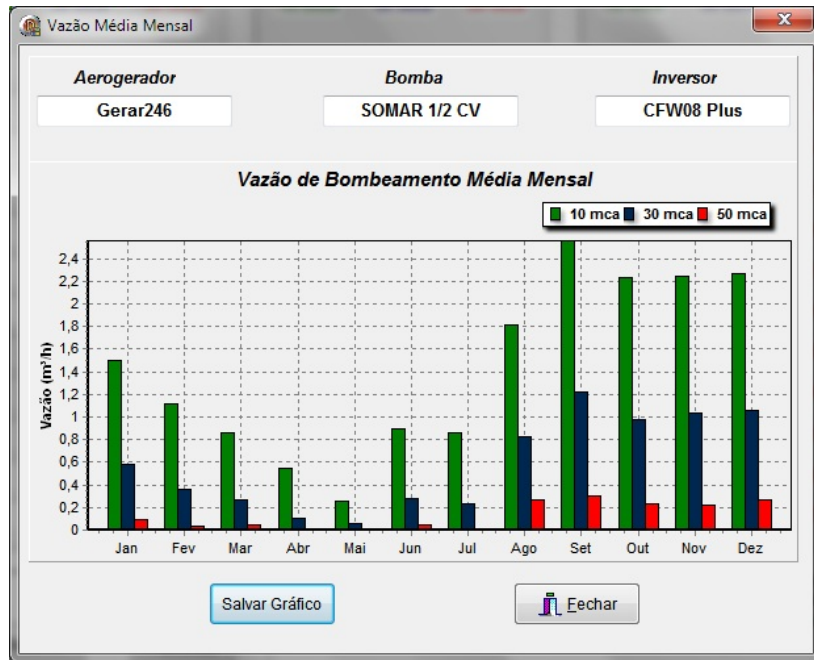


Figura 4.34 – Gráfico da vazão média de bombeamento de água.

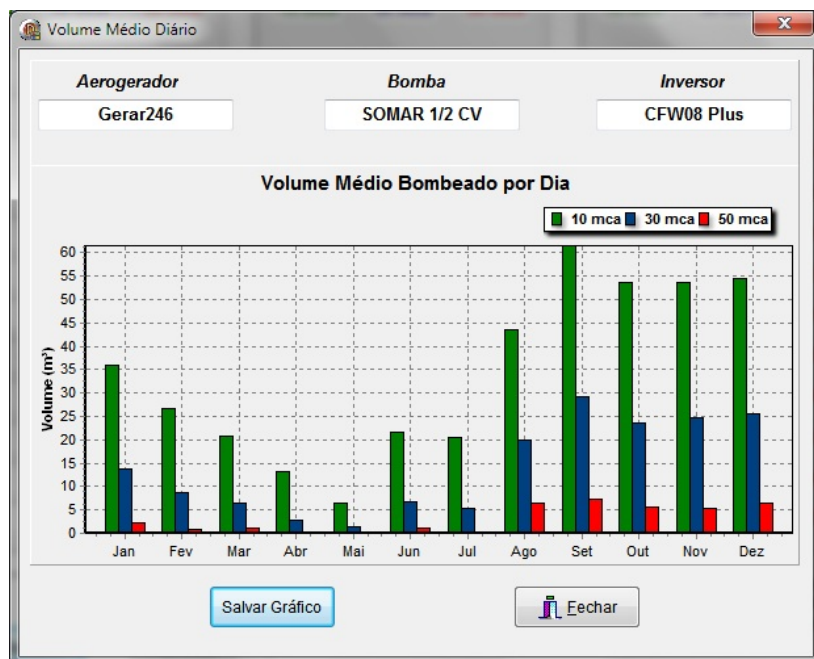


Figura 4.35 – Gráfico do volume de água bombeado.



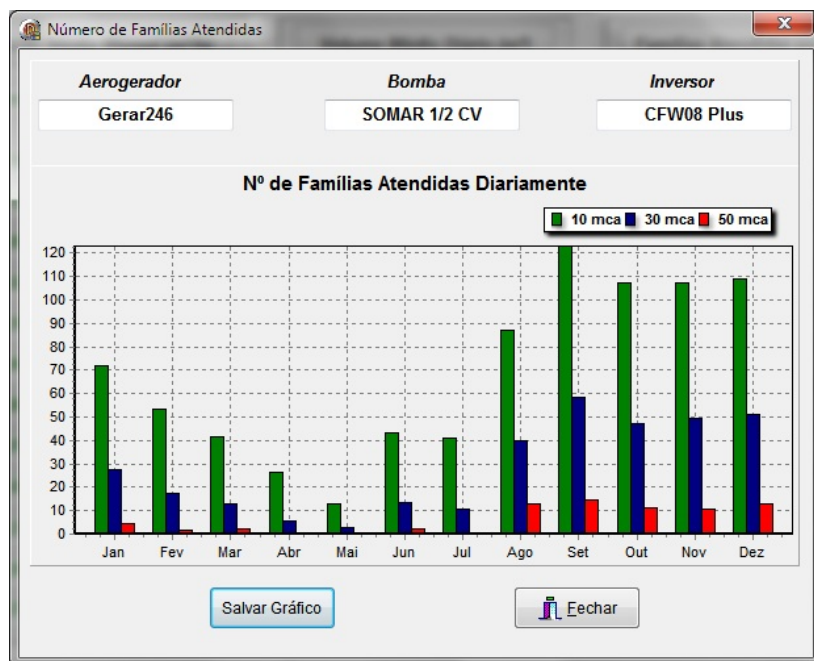


Figura 4.36 – Gráfico do número de famílias atendidas.

Para cada gráfico, existe a possibilidade de armazená-lo em um arquivo de imagem no formato *.jpg* e, se for de interesse do usuário, também é possível armazenar os valores numéricos em um arquivo de texto.

Outras simulações podem ser feitas, retornando-se à tela desejada, refazendo-se as seleções dos equipamentos. Caso não haja necessidade, fecha-se a janela principal e aciona-se o botão "Sair", encerrando o programa.

### 4.3 – Análise dos Resultados

O dimensionamento de um sistema de bombeamento de água segue critérios específicos para cada necessidade. As formas convencionais para dimensionar o sistema consideram que o conjunto motobomba é alimentado pela rede elétrica com potência constante e sempre que for necessário.

Para os métodos aplicados, a fonte de alimentação a ser utilizada é a energia eólica, para a qual, por sua característica intermitente, nem sempre a energia estará disponível para acionar a bomba centrífuga, visto que o inversor trabalha em uma determinada faixa de tensão.

Comparando-se os valores de vazão calculados a partir dos dados obtidos em laboratório (método 2) com os valores de vazão obtidos pela equação 4.3 (método 1), verifica-se que apenas parte dos valores encontrados teoricamente seria realmente bombeado, mostrando que para o local escolhido uma outra combinação de aerogerador, motobomba e inversor poderia ter um desempenho mais eficiente, ou seja, seus resultados estariam mais próximos do valores teóricos. Essa comparação é mostrada na figura 4.37, cuja curva foi obtida com a interpolação logarítmica das curvas das três alturas manométricas fornecidas.

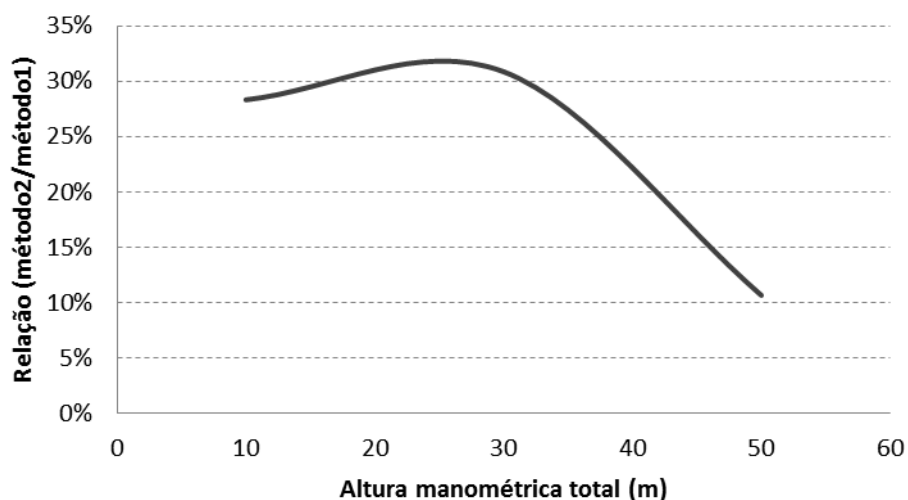


Figura 4.37 – Relação entre os resultados de bombeamento (método2/método1).

Portanto, para se evitar ao máximo um dimensionamento errôneo do sistema, deve-se optar pelos equipamentos que contenham informações de

funcionamento obtidas na prática em campo, ou através de bancadas experimentais. Porém, nada impede que se utilizem os resultados teóricos calculados com dados fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos para dimensionar o sistema de bombeamento, desde que se tenha em mente que os resultados obtidos com essa metodologia, servem apenas de indicativo para um estudo mais detalhado.

O programa AERBOM é de fácil utilização, e seus resultados são apresentadas de forma clara e objetiva, permitindo uma avaliação simples dos resultados e facilitando a tomada de decisão sobre a viabilidade, ou não, da instalação dos equipamentos. Sendo possível a instalação do sistema, a definição sobre a finalidade do uso da água pode ser planejada, fazendo com que a comunidade beneficiada possa investir em um processo produtivo que beneficie a todos.

## CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma ferramenta computacional para análise de uma sistema de bombeamento utilizando um aerogerador de pequeno porte acoplado a um conjunto motobomba através de um inversor de frequência.

Como exposto, um sistema de bombeamento de água utilizando o recurso eólico é perfeitamente capaz de atender as demandas de uma comunidade isolada, mesmo com baixas velocidades de vento, desde que essas velocidades sejam suficientes para o acionamento do rotor eólico.

A obtenção dos dados de vento do local é o principal fator a ser considerado, e sendo esses dados satisfatórios, verificam-se as outras condições como: potencial hídrico, local para a instalação, acesso à comunidade, etc.

Algumas vantagens deste sistema em relação ao que utiliza um gerador a diesel estão relacionadas à vida útil do aerogerador, à pouca necessidade de manutenção, além de ser não poluente.

A metodologia utilizando apenas valores teóricos para se estimar a vazão de bombeamento apresenta limitações, devido ao modelo simplificado, mas pode servir de indicativo, ao passo que quando se dispõe de dados experimentais dos equipamentos, os resultados tornam-se mais confiáveis, resultando em um planejamento mais eficiente.

O programa AERBOM é uma ferramenta bastante útil, quando nele são inseridos dados de bombas centrifugas obtidos em bancada de testes e, com isso, fazendo com que um planejamento sobre o uso da água seja realizado.

Portanto, a possibilidade de se estimar a capacidade do sistema de forma antecipada permite a tomada de decisão sobre a viabilidade ou não do empreendimento.

Como propostas para trabalhos futuros recomenda-se:

- Validar o programa obtendo dados de bombeamento em campo e comparando com os valores simulados, para um mesmo conjunto de equipamentos (aerogerador, inversor e bomba centrifuga);

- Realizar ensaios em uma bancada de testes de bombas para diferentes modelos de bombas e inversores, ampliando o banco de dados do programa;
- Fazer um estudo sobre aerogeradores de pequeno porte com a finalidade de se encontrar uma relação entre a velocidade do vento e a tensão e/ou corrente na saída do aerogerador;
- Inserir no programa outras opções de fontes de energia, como a solar, por exemplo, hibridizando o sistema de bombeamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORA, M. A B., “Análise da Interligação de Parques Eólicos a Sistemas Elétricos de Potência”. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal Do Pará, Belém, 2001.

BERGEY Windpower Co., “WindCad Turbine Performance Model BWC XL.1 Battery Charging Version”, 2000.

BRITO, A. U., “Otimização do Acoplamento de Geradores Fotovoltaicos a Motores de Corrente Alternada Através de Conversores de Frequência Comerciais Para Acionar Bombas Centrífugas”, Tese (Doutorado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) - EP/ FEA/ IEE/ IF da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2006.

CAMPOS, F. G. R., “Geração de Energia a partir de Fonte Eólica com Gerador Assíncrono conectado a Conversor Estático Duplo”. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, São Paulo, 2004.

CAPELLI, A., “Inversores de Frequência”, Revista Mecatrônica Atual nº 2, Fevereiro de 2002.

COSTA FILHO, W. D.; GALVÃO, M. J. T. G.; LIMA, J. B. L. e LEAL, O., “Noções Básicas Sobre Poços Tubulares – Cartilha Informativa”. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 1998.

ENERSUD, “Informações Aerogerador 1kW – Características Técnicas do Aerogerador GERAR 246”, Enersud Ind. e Soluções Energéticas Ltda., Rio de Janeiro, 2011.

FERREIRA, C. R., “Potencial de bombeamento eólico: uma metodologia de análise”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2006.

FRADE, L. C. S., “Estudo da Potencialidade de Energia Eólica no Litoral do Estado do Pará”, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2000.

GASCH, R. e TWELE, J., “Wind Power Plants , Fundamentals, Design, Construction and Operation”, Solar praxis AG, 2001.

JACUZZI, “Noções de hidráulica”, Literatura técnica, disponível em <http://www.jacuzzi.com.br/downloads.php>, 2010.

JONES, K. C., “Using Biotic Factors to Estimate Average Annual Wind Speed”, Idaho National Laboratory, Idaho, USA, 2000.

KOUTROULIS, E., KOLOKOTSA, D., POTIRAKIS A. e KALAITZAKIS K., “Methodology for Optimal Sizing of Stand-alone Photovoltaic / Wind-Generator Systems using Genetic Algorithms”, Solar Energy 80, 1072-1088, 2006.

LEÃO, M., “Borland Delphi 7: Curso Completo”. Editora Axel Books, Rio de Janeiro, 2003.

LEMMER, E. C.; “Wind-Electric Pump System Design”. Submitted in partial fulfillment for the degree Master of Science in Engineering – Stellenbosch University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering, 2009.

LIMA, E. P. C., “Mecânica das Bombas”. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MATHEW, S., “Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics”. Ed. Springer, 2006.

MEDEIROS FILHO, C. F., “Abastecimento de Água”, Notas de aulas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2009.

NUNES, M.V.A.; “Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas”. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

OLIVEIRA, J. B., “Sistemas Inteligentes e Wavelets para Previsão de Vento e Geração Eólica”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade da Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

PINHO, J.T.; PEREIRA, E. J. S.; BARBOSA, C. F. O.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N., “Sistemas híbridos - Soluções energéticas para a Amazônia”. Brasília : Ministério de Minas e Energia, 2008.

RECH, C.; CAMARGO, R. F.; CAMPOS, M.; SALVADORI, F.; LEANDRO, G. V.; BOLACELL, J. C. O., “Impacto de Métodos de Sincronismo do Desempenho de Geradores de Indução Autoexcitados”, SBA Controle & Automação, 2008.

RIBEIRO, C. M. F., “Circuito de Interface para Ligação de um Gerador Eólico à Rede”, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2008.

ROHATGI, J. S.; NELSON, V., “Wind Characteristics – An Analysis for the Generation of Wind Power”, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University, 1994.

SANCHES, I. J., “Métodos Numéricos”, Departamento de Informática, Universidade Federal do Paraná, 2007.

SILVA, M. A.; LENGSELD, F. L.; DUARTE, R. e ALTIERI, C., “Manual de treinamento: Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas”, KSB Bombas Hidráulicas S/A, 5ª ed., 2003.



SIMÕES, T., “Base de dados do potencial energético de vento em Portugal – Metodologia e Desenvolvimento”, Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2004.

SWANEPOEL, P. F. R., “Dynamic Compensation for Performance Characteristic Differences of Wind Generator Coupled Pumps”, Nelson Mandela Metropolitan University, Port Elizabeth and George, 2007.

TSUTIYA, M.T.; “Abastecimento de água”. 1ª ed. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

VAN MEEL, J. e SMULDERS, P.; “Wind Pumping: A Handbook”. World Bank technical paper, Washington D.C., USA, 1989.

VISUALPHOTOS, “Royalty Free Professional Stock Images (RF)”, 2011. Disponível em <http://www.visualphotos.com>. Acessado em 28/05/2012.

WALKER, J. F. e JENKINS, N., “Wind Energy Technology”. John Wiley and Sons, Ltd., 1997.

WEG, “Motores de Indução alimentados por Inversores de Frequência PWM”, Guia técnico disponível em <http://www.weg.net>. Acessado em 15/04/2011

WHO, “Domestic Water Quantity, Service Level and Health”, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2003.

ZANON, E. R., “Manutenção de Sistemas de Irrigação: Bombeamento”, V Simpósio de Citricultura, 03 a 04 de outubro, Bebedouro, SP, 2007.

ZILLES, R.; BRITO, A. U. e FEDRIZZI, M. C., “Relatório 2 - Avaliação do acoplamento de geradores fotovoltaicos com motores de corrente alternada

através de conversores de frequência comerciais para acionar bombas centrífugas”. 2005.