

TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DE  
ENERGIA EÓLICA

# Conteúdo

|   |           |
|---|-----------|
| Dedicatória.....  | I         |
| Agradecimentos.....                                     | II        |
| Lista de figuras.....                                   | III       |
| Lista de tabelas.....                                   | IV        |
| Lista de símbolos.....                                  | V         |
| Resumo.....   | VI        |
| <b>1. Introdução e Objectivos.....</b>                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Introdução.....                                     | 1         |
| 1.2 Objectivos.....                                     | 1         |
| <b>2. Fundamentos teóricos.....</b>                     | <b>2</b>  |
| 2.1 Conceito de energia.....                            | 2         |
| 2.2 Classificação dos recursos energéticos.....         | 2         |
| 2.3 Energia eólica.....                                 | 2         |
| 2.3.1 Potência eólica.....                              | 3         |
| 2.3.2 Lei de Prandtl.....                               | 4         |
| 2.3.3 Distribuição de Weibull.....                      | 4         |
| 2.4 Tecnologia.....                                     | 5         |
| 2.4.1 Turbinas eólicas.....                             | 5         |
| 2.4.1.1 Princípio de funcionamento.....                 | 5         |
| 2.4.2 Classificação das turbinas eólicas.....           | 5         |
| 2.4.2.1 Turbinas de eixo horizontal.....                | 6         |
| 2.4.2.2 Turbinas de eixo vertical.....                  | 6         |
| 2.4.2.3 Turbinas de alta e baixa solidez.....           | 7         |
| 2.5 Características de turbinas eólicas.....            | 7         |
| 2.6 Forças actantes nas pás das turbinas.....           | 8         |
| 2.6.1 Arrasto.....                                      | 9         |
| 2.6.2 Sustentação.....                                  | 9         |
| 2.7 Control de potência.....                            | 9         |
| 2.7.1 Entrada em perda (Stall).....                     | 9         |
| 2.7.2 Variação do passo (Pitch).....                    | 10        |
| 2.8 Optimização da conversão.....                       | 11        |
| 2.8.1 Característica eléctrica do aerogerador.....      | 11        |
| 2.9 Componentes de um sistema eólico.....               | 12        |
| 2.10 Critérios de ligação.....                          | 13        |
| 2.11 Gerador eléctrico.....                             | 14        |
| 2.11.1 Máquina de corrente contínua (DC).....           | 15        |
| 2.11.2 Máquina síncrona.....                            | 15        |
| 2.11.3 Máquina assíncrona.....                          | 15        |
| 2.12 Vantagens e desvantagens da tecnologia eólica..... | 15        |
| 2.12.1 Vantagens.....                                   | 15        |
| 2.12.2 Desvantagens.....                                | 16        |
| 2.13 Aplicações dos sistemas eólicos.....               | 16        |
| 2.14 Metodologia.....                                   | 17        |
| 2.14.1 Métodos de medição do vento.....                 | 17        |
| <b>3. Resultados e Discussão.....</b>                   | <b>18</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. Conclusões e Recomendações.....</b> | <b>20</b> |
| 4.1 Conclusões.....                       | 20        |
| 4.2 Recomendações.....                    | 20        |
| <b>5. Referências Bibliográficas.....</b> | <b>21</b> |
| <b>Anexo0.....</b>                        | <b>22</b> |

# Dedicatória

*Ao meu Pai e à memória de minha Mãe, que me  
educaram no culto da honra, do trabalho e da  
verticalidade de caráter.*

# Agradecimentos

A Deus Eterno.

Aos docentes do departamento de física, pela valiosa orientação e direccionamento durante o curso, em particular: Prof. Doutor Guamba, Prof. Doutor Pondéca, Prof. Doutor Mapossa, Prof. Doutor Uthui, Prof. Doutor Mutimucui, Prof. Doutor Burdeiny, Prof. Doutor Tch-enyeh, Prof. Doutor Akil, Prof. Doutor Rakov, dr. Genito, dr. Mahumane, dr. Chenene, dr. Chea, dr. Cláudio e ao corpo técnico e administrativo do departamento de física, pelo apoio prestado ao longo do curso.

A minha cara metade, pela paciência que teve ao partilhar todos momentos difíceis por mim vividos, pelo amor, e pelo carinho.

Aos meus pais, pela oportunidade que me deram de até aqui poder chegar, bem como a toda minha família, irmãos e irmãs, em especial ao Valentinho meu adorado.

Aos colegas Magaia, Marrenjo, Meque, Matuele, Badri, Ridwan, Sitóé, Araide, Hallo, Saraira, Ivóktia, Luis, Hermínia pelo apoio e troca de ideias.

Aos amigos, pela confiança que depositaram em mim e pela força que me deram ao longo de toda caminhada.

A todos, o meu muito obrigado.

# Conteúdo

---

*André Fenias Moiane*

*iii*

# Lista de Figuras

- Figura 1: Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal respectivamente.
- Figura 2: Eficiência do rotor em função da taxa de velocidade.
- Figura 3: Curvas de potência de uma turbina por variação do ângulo de passo e perda aerodinâmica.
- Figura 4: Efeito de ângulo de passo no rendimento da turbina.
- Figura 5: Apresentação de diversas partes constituintes de um sistema eólico.
- Figura 6: Gráfico da variação mensal da velocidade do vento.
- Figura 7: Gráfico da variação mensal da energia do vento.

# Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores típicos do comprimento característico da rugosidade do solo  $z_0$  e do coeficiente de fricção  $\alpha$ .

Tabela 2: Variação mensal da energia eólica na região sul de Moçambique (Maputo, Xai-Xai e Inhambane).

Tabela 3: Variação da energia eólica em função do tamanho do aeromotor.

Tabela 4: Variação anual da energia eólica na região sul de Moçambique (Maputo, Xai-Xai e Inhambane).

# Lista de Símbolos

- $u_1$  - velocidade média de referência medida na altura  $h_1$ ;  
 $\bar{u}$  - velocidades médias;  
 $c$  - velocidade característica do vento;  
 $u_{ann}$  - velocidade média anual;  
 $\rho$  - massa específica do ar;  
 $C_p$  - coeficientes de potência;  
 $C_q$  - coeficiente de conjugado;  
 $P_{mec}$  - potência mecânica no veio da turbina;  
 $P_{disp}$  - potência disponível na ausência de turbina;  
 $\lambda, W, A$  - relação de velocidade, rotação da turbina e área de secção plana transversal do rotor da turbina;  
 $R, T$  - raio do rotor medido na ponta da pá e conjugado desenvolvido desenvolvido pelo rotor eólico;  
 $D, L, C_D, C_T$  - forças de arrasto e sustentação e seus respectivos coeficientes;  
 $\Gamma$  -  $TSR$  - velocidade relativa do ar e razão de velocidades na pá;  
 $\sigma, \alpha$  - parâmetro de solidez e ângulo de ataque;  
 $c, D$  - corda a  $0,7m$  do raio das pás e diâmetro do rotor;  
 $E_n$  - valor esperado para energia eléctrica produtível anualmente;  
 $\eta_0, \eta_{mar}$  - velocidade de cut-in e velocidade de cut-out;  
 $Q$  - quantidade de calor transferido;  
 $\Delta U$  - variação de energia interna;  
 $W$  - trabalho realizado;

## **Resumo**

O aquecimento do planeta terra nos últimos anos tem sido uma grande preocupação para todo o mundo, colocando em perigo todo o ser vivo. A principal causa deste fenómeno resulta do desenvolvimento tecnológico, pelo uso de máquinas a vapor e de explosão com maior rendimento. Para a redução deste problema torna-se necessário e urgente o uso de tecnologias de energias renováveis, sendo uma das alternativas a energia eólica.

Esta tecnologia é de extrema importância, e bastante actual para o desenvolvimento sócio-económico do país, principalmente nas zonas rurais onde não existe o acesso a rede eléctrica convencional e em áreas como transportes e comunicações.

Em Moçambique, a implementação da tecnologia eólica é bastante fraca devido a falta de equipamento necessário para implementação desta, ao reduzido número de pessoal formado capacitado para o efeito e falta de assistência técnica do pouco material existente.

No trabalho apresentado fez-se uma avaliação dos valores médios da energia eólica e sua variação com o tempo para cidades de Maputo, Xai-Xai e Inhambane. Os resultados obtidos fazem-nos acreditar que os níveis de energia obtidos não são suficientes para implementação de aerogeradores de classe larga e muito larga, servindo de forma considerável para implementação de aeromotores de classe intermédia suficientes para satisfação das necessidades básicas da população.

# 1. Introdução e Objectivos

## 1.1 Introdução

Após o surgimento da crise do petróleo no início da década de 70, as energias renováveis apareciam como alternativa possível e imediata. Nessa altura, e atendendo as preocupações mundiais com o aumento do preço do barril de petróleo, o objectivo consistia apenas na substituição do petróleo e na diversificação das fontes de energia, de tal modo que as soluções alternativas satisfizessem, em condições favoráveis as necessidades energéticas (Tabora, 2002).

O ritmo com que se verifica o consumo actual dos recursos energéticos fósseis, e as perspectivas da sua evolução a curto e a médio prazo, coloca dois importantes problemas de toda a actualidade: O primeiro prende-se com questões de ordem ambiental, como consequência da transformação e do consumo da energia fóssil; o segundo, resulta do facto de os recursos energéticos fósseis serem finitos, ou seja, esgotáveis.

Por outro lado, para Moçambique, um país do terceiro mundo, a pesquisa da tecnologia eólica é matéria de extrema importância, e bastante actual para o desenvolvimento sócio-económico, principalmente nas zonas rurais onde a rede eléctrica convencional é bastante fraca devido a factores económicos e em áreas como transportes e comunicações. É de realçar que, o uso desta tecnologia contribuirá em grande medida para a preservação do meio ambiente, diminuindo o desflorestamento em zonas específicas nos arredores de grandes centros urbanos e ao longo dos principais corredores.

## 1.2 Objectivos

- Estudar tecnologias de aproveitamento de energia eólica;
- Avaliar o potencial eólico na região sul do país (cidades de Maputo, Xai-Xai e Inhambane);
- Usar a tecnologia eólica como instrumento para cativar a população ao abandono de fontes energéticas mais poluentes a favor das renováveis.

## 2. Fundamentos teóricos

### 2.1 Conceito de energia

Este conceito surge no século XIX como forma de explicar diferentes fenómenos que se relacionam entre si. A energia é definida como a capacidade que um sistema físico possui de realizar trabalho (Escovar, 1996).

Segundo Yavoriski (1984), uma das propriedades fundamentais da energia é a lei de conservação de energia, dada pela expressão:

$$Q = \Delta U + W \quad (1)$$

onde:  $Q$  - quantidade de calor transferido;  $\Delta U$  - variação de energia interna;  $W$  - trabalho realizado.

Da lei de conservação de energia deriva um importante teorema, o de *trabalho-energia*:

$$E_1 - E_2 = W \quad (2)$$

### 2.2 Classificação dos recursos energéticos

Os recursos energéticos classificam-se em finitos (convencionais) e infinitos (renováveis).

**Energias renováveis:** eólica, solar, geotérmica, hidroeléctrica, fusão nuclear, das marés, das ondas, etc.

**Energias não renováveis:** gás, carvão mineral, petróleo, nuclear, etc.

A principal diferença entre estes dois recursos é: os convencionais são mais poluentes, são esgotáveis e concentrados com elevadas densidades de fluxo na ordem de  $100\text{kw}/\text{m}^2$ , enquanto que os renováveis são pouco poluentes, inesgotáveis e com baixa densidade de fluxo por volta de  $1\text{kw}/\text{m}^2$  (John, 1986).

### 2.3 Energia Eólica

A energia eólica resulta da transformação de parte do efeito térmico solar em energia cinética da atmosfera. A diferença de radiação solar sobre regiões distintas do planeta provoca o deslocamento de camadas de ar, os ventos.

Segundo Castro (2003), para o levantamento deste potencial energético é necessário distinguir três níveis diferentes de energia:

- Energia cinética armazenada na atmosfera, resultante do efeito solar;
- Energia cinética teoricamente recuperável, contida entre 5 e 100m de altitude;
- Energia cinética praticamente recuperável, avaliada a 0.2 a 2% do consumo mundial.

Apesar de representar uma pequena parcela do consumo mundial, a energia eólica praticamente recuperável representa um importante potencial para regiões diversas e usos específicos. Além disso, a energia eólica é caracterizada pelo seu aspecto difuso e por sua aleatoriedade, indicando propriedades peculiares para seu emprego e possibilidades de fornecimento de grandes parcelas de energia.

### 2.3.1 Potência eólica

Uma condição necessária para a apropriação da energia do vento é a existência de um fluxo permanente e forte de vento. As turbinas modernas são projectadas para atingirem a potência máxima para velocidades de vento da ordem de 10 a 15 m/s (Castro, 2003).

A energia mecânica disponível no veio de uma turbina eólica é dada por:

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho C_p A u^3 \quad (3)$$

Onde:  $\rho$  é massa específica do ar;  $C_p$  é coeficiente de potência;  $A$  é área de secção transversal do rotor da turbina e  $u$  é a velocidade média do vento.

A aplicação de conceitos da mecânica de fluídos permite demonstrar a existência de um máximo teórico para o rendimento da conversão eólico-mecânica cujo valor é 59,3% (16/27), e é conhecido como *Limite de Betz*.

Segundo Castro (2003), o rendimento efectivo da conversão numa turbina eólica depende da velocidade do vento, e é dado por:

$$C_p(u) = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} \quad (4)$$

em que  $P_{disp}$  é a potência disponível na ausência da turbina.

### 2.3.2 Lei de Prandtl

A variação da velocidade do vento com a altura do solo é expressa pela fórmula empírica:

$$u(h) = u_1 \left[ \frac{h}{h_1} \right]^\alpha \quad (5)$$

onde  $u_1$  é a velocidade média de vento medida na altura  $h_1$  (em geral 10m) e  $\alpha$  é um coeficiente dependente da natureza do terreno e varia com a velocidade de vento (SADAC Project, 1999).

Tabela 1: Valores do comprimento da rugosidade do solo  $z_0$  e do coeficiente de fricção  $\alpha$ .

| Tipo de terreno | Exemplo                              | $z_0(m)$                             | $\alpha$                          |      |
|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------|
| plano           | praia, gelo, neve, oceano            | 0.005                                | 0.10                              |      |
|                 |                                      | aberto                               | relvado baixo, campos, aeroportos | 0.03 |
|                 |                                      | areia, relvado alto, culturas baixas | 0.10                              |      |
| rugoso          | cultura de cereais, bosque, arbustos | 0.25                                 | 0.20                              |      |
| muito rugoso    | florestas, pomares                   | 0.50                                 | 0.25                              |      |
| fechado         | vilas, subúrbios                     | 1.00                                 | 0.30                              |      |
| idades          | centro de cidades                    | > 2                                  | 0.40                              |      |

Fonte: (SADAC Project, 1999).

### 2.3.3 Distribuição de Weibull

As flutuações do vento constituem um fenômeno estocástico que pode ser representado por métodos estatísticos. A distribuição de frequência de ocorrência de ventos tem sido satisfatoriamente modelada através da *distribuição de Weibull*, expressa pela função:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{c} \left( \frac{\bar{u}}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{\bar{u}}{c} \right)^k \right] \quad (6)$$

onde:  $\bar{u}$  é velocidade média do vento,  $c$  é velocidade característica do vento, e  $K$  é factor de forma e varia entre 1.5 e 3.5. Para  $k = 2$  a distribuição de *Weibull* reduz-se à distribuição uniparamétrica de *Rayleigh* (Shepherd, 1983):

$$f(\bar{u}) = \frac{\pi}{2} \frac{\bar{u}}{u_{rms}^2} \exp \left[ - \frac{\pi}{4} \left( \frac{\bar{u}}{u_{rms}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

onde  $u_{rms}$  é a velocidade média anual.

## **2.4 Tecnologia**

Para o aproveitamento da energia eólica existem vários tipos de tecnologias usadas:

- Turbinas eólicas ou aerogeradores;
- Aeromotores ou geradores eléctricos;
- Moinhos de vento.

A quantidade de electricidade que pode ser gerada pelo vento depende de quatro factores: quantidade de vento que passa pela hélice, diâmetro da hélice, dimensão do gerador e do rendimento total do sistema (Silva, 2002).

### **2.4.1 Turbinas eólicas**

Representam a principal tecnologia utilizada para transformação da energia cinética do vento em mecânica para produção de energia eléctrica.

#### **2.4.1.1 Princípio de funcionamento**

Uma turbina eólica é formada essencialmente por um conjunto de pás sob a acção do vento. As forças que são exercidas sobre essas pás fazem com que estas girem em torno de um eixo produzindo deste modo energia mecânica que posteriormente será transformada em eléctrica.

### **2.4.2 Classificação das Turbinas Eólicas**

Os critérios de classificação de turbinas eólicas baseam-se no seguinte:

- Direcção do eixo de rotação em relação ao vento (eixo horizontal e eixo vertical);
- Qualidade das forças predominantes (arrasto e sustentação);
- Quantidade de material existente no rotor (baixa e alta solidez).

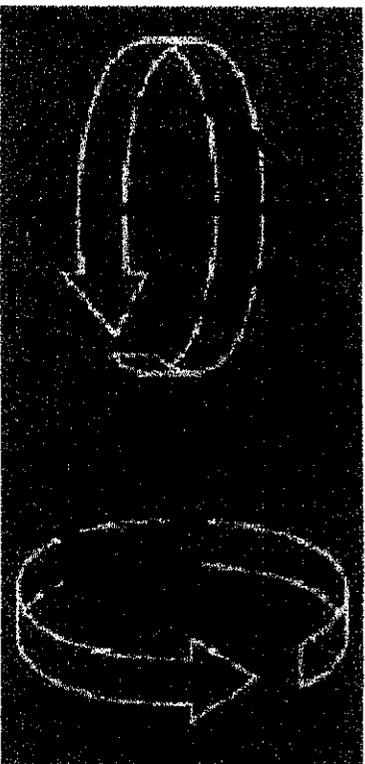


Figura 1: Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal respectivamente (Eólicas, 2004).

#### **2.4.2.1 Turbinas de eixo horizontal**

Apresentam o seu eixo de rotação em paralelo com a direcção do vento. Neste tipo de turbinas se encontram os modelos *multipás, americano e as rápidas de 1, 2 e 3 pás*.

*Rotor multipás* - actualmente representam a maioria das instalações eólicas, tendo sua maior aplicação no bombeamento de água. Dispõe de uma boa relação torque de partida / área varrida pelo rotor, seu melhor rendimento encontra-se nas baixas velocidades, limitando a potência máxima extraída por área do rotor.

*Rotor de três ou duas pás* - são praticamente o padrão de rotores utilizados nos aerogeradores modernos, isto deve-se ao facto da grande relação de potência extraída por área varrida pelo rotor, além do seu rendimento máximo ser o melhor entre todos os tipos, situa-se em velocidades mais altas.

#### **2.4.2.2 Turbinas de eixo vertical**

Não são muito usadas, pois o aproveitamento do vento é menor. As mais comuns são: *Savonius, Darrieus e Molinete*. A principal vantagem deste tipo de turbina é a sua independência da direcção do vento, no entanto os esforços exercidos nas pás pela força centrífuga limitam sua velocidade e simplificam os mecanismos de transmissão de potência.

*Rotor Savonius* - Apresenta sua curva de rendimento em relação a velocidade próxima a do rotor multipás de eixo horizontal, mas numa faixa mais estreita, e de menor amplitude, seu uso é mais indicado para aeromotores, principalmente para pequenos sistemas de bombeamento de

água.

*Rotor Darrieus* - Por ter curva de rendimento característica próxima a dos rotores de três pás de eixo vertical, são mais compatíveis com o uso em aerogeradores. Além disto a necessidade de sistema de direccionamento é compensada pela facilidade de implementação de sistemas aerodinâmicos de limitação e controle de potência.

### **2.4.2.3 Turbinas de alta e baixa solidez**

Um parâmetro importante na projecção de turbinas eólicas é a relação entre a área total das pás do rotor e a área varrida por estas, num perímetro correspondente a 70% do raio das pás. Este parâmetro é conhecido por solidez ( $\sigma$ ) e vale:

$$\sigma = \frac{nc}{0.7\pi D} \quad (8)$$

onde: n = número de pás; c = corda a 0.7m do raio das pás; D = diâmetro do rotor.

A solidez das turbinas eólicas modernas atinge os valores entre 5% e 10%, projectadas para altas eficiências e altas velocidades o que implica aplicações direccionadas à geração de energia eléctrica. No caso de uma turbina múltipás a solidez excede 50% (Silva, 2002).

Rotores de alta solidez apresentam uma alta característica de partida e bom desempenho em baixas velocidades (turbinas de eixo vertical).

Rotores de baixa solidez operam a velocidades elevadas, a rendimentos maiores e com pobre característica de partida. Dentre as turbinas de baixa solidez as de eixo horizontal tem sido amplamente empregues em faixas de potência de 100W a 3.2MW (Silva, 2002).

## **2.5 Características de Turbinas Eólicas**

A potência desenvolvida por uma turbina eólica depende da velocidade do vento e da velocidade rotacional. A relação entre a potência, a velocidade do vento e a velocidade rotacional é apresentada por coeficientes adimensionais, afim de tornar esta informação aplicável em diversas circunstâncias. Dois parâmetros mais usados para descrever estas relações são a relação de velocidade  $\lambda$  e o coeficiente de potência  $C_p$ , que são definidos como:

$$\lambda = \frac{WR}{V} \quad (9)$$

onde  $R$  é o raio do rotor, medido na ponta da pá;  $W$  é a rotação da turbina.

O factor de aproveitamento aerodinâmico da turbina ou coeficiente de potência é dado por:

$$C_p(u) = \frac{P_{mec}}{P_{disp}} \quad (10)$$

Outro parâmetro adimensional importante é o coeficiente de conjugado ou característica dado por:

$$C_q = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho A R V^2} \quad (11)$$

onde  $T$  é o conjugado desenvolvido pelo rotor eólico.

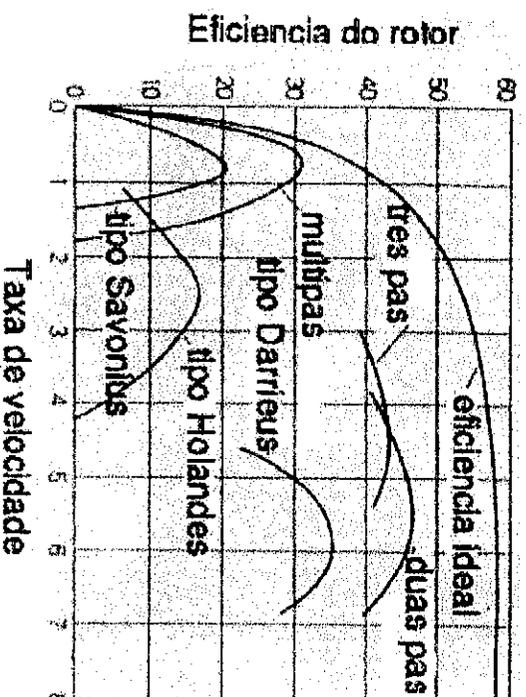


Figura 2: Eficiência do rotor em função da taxa de velocidade (Mukund, 1999).

## 2.6 Forças actuantes nas pás da turbina

A qualidade das forças predominantes na operação de uma turbina eólica dita praticamente suas características básicas. A resultante destas forças é dada por duas componentes, *arrasto* e *sustentação*.

### 2.6.1 Arrasto

A força de arrasto,  $D$ , é paralela à velocidade relativa do vento e é dada por:

$$D = \frac{1}{2} \rho_{ar} V^2 . S . C_D (\alpha) \quad (12)$$

As turbinas que funcionam por arrasto (modelo Savonius por exemplo) apresentam em norma baixas velocidades rotacionais, baixo rendimento aerodinâmico e um custo elevado pela grande quantidade de material envolvido.

### 2.6.2 Sustentação

A sustentação,  $L$ , é perpendicular à velocidade relativa de vento e é dada por:

$$L = \frac{1}{2} \rho_{ar} V^2 . S . C_L (\alpha) \quad (13)$$

As turbinas rápidas como as tri-pás, bi-pás, monópteros e Darriens, se caracterizam por operarem por sustentação apresentando elevadas velocidades e altos rendimentos aerodinâmicos sendo, portanto, indicadas para geração de electricidade.

Onde:  $D$  -força de arrasto;  $L$  -força de sustentação;  $C_D$  e  $C_L$  são coeficientes de arrasto e sustentação;  $\alpha$  - ângulo de ataque;  $V$  - velocidade relativa do ar;  $S$  -secção recta da pá; e  $\rho_{ar}$  é densidade do ar.

## 2.7 Control de Potência

### 2.7.1 Entrada em perda (*stall*)

As turbinas que controlam a potência usando o método de entrada em perda têm as pás fixas, ou seja não rodam em torno de um eixo longitudinal, tem o ângulo de passo  $\beta$  constante.

O control de potência assenta nas características aerodinâmicas das pás do rotor que são projectadas para entrar em perda apartir de uma certa velocidade de vento. Uma vez que as pás estão colocadas a um dado ângulo de passo fixo, quando o ângulo de ataque aumenta, a componente de sustentação diminui, ao mesmo tempo que as forças de arrastamento passam a ser dominantes e a pá entra em perda (Castro, 2003).

A grande simplicidade desta regulação está na ausência de mais partes em movimento, tornando mais barata;

Tem como vantagens a incapacidade das turbinas auxiliarem os processos de arranque e paragem, tornando necessária a disposição de um motor auxiliar de arranque para trazer o rotor até a velocidade adequada.

### 2.7.2 Variação do passo (*pitch*)

Esta opção para limitar a potência do vento, a altas velocidades, consiste em permitir a rotação de toda a pá em torno do seu eixo longitudinal; neste caso, diz-se que o control é feito por variação do passo das pás, exactamente porque se actua sobre o ângulo de passo  $\beta$ .

Para velocidades do vento superiores à nominal, o sistema de control do passo actua de modo que o binário motor produzido corresponda à potência nominal.

No processo de paragem não é possível colocar as pás na posição ideal para o efeito ( $\Theta = 90^\circ$ ), pelo que é exigido um sistema complementar de travagem por meios aerodinâmicos. Tem como vantagem o bom control de potência, para todas as gamas de variação de velocidade do vento.

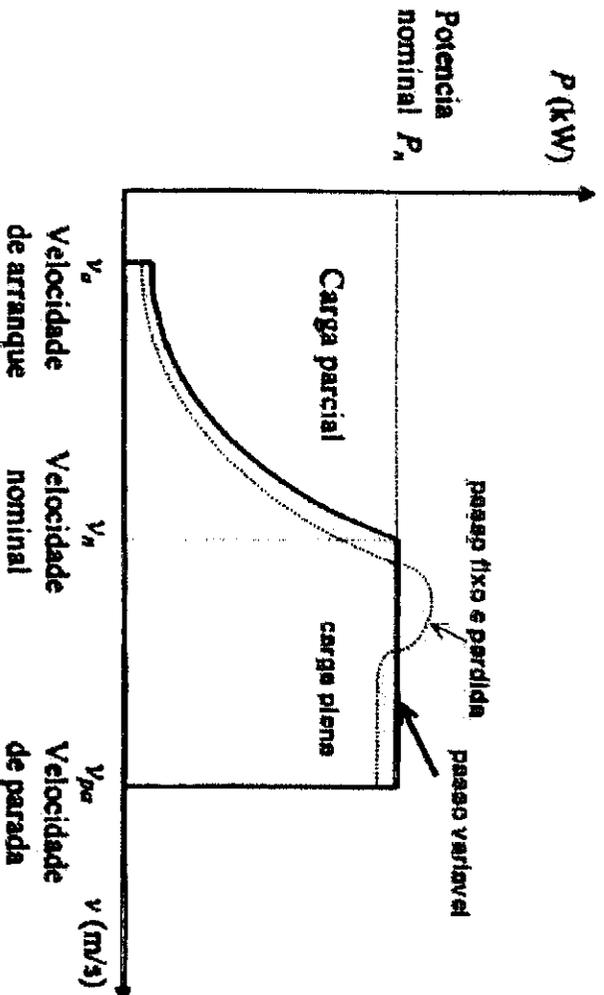


Figura 3: Curvas de potência por variação do passo e perda aerodinâmica (Neumann, 2002).

## 2.8 Otimização da Conversão

Se o rotor rodar devagar, a perturbação induzida no escoamento pelo movimento do rotor será pequena, no caso contrário, o vento encarrá-o como uma parede. Daqui resulta que a velocidade de rotação deverá ser compatibilizada com a velocidade do vento, por forma a obter a máxima eficiência de conversão, isto é um coeficiente de potência  $C_p$  máximo. A relação entre a velocidade linear (m/s) da extremidade da pá da turbina de raio  $r$ (m), rodando a uma velocidade  $\omega$  (rad/s), e a velocidade do vento  $u$  (m/s) é caracterizada por um factor adimensional, conhecido por *razão de velocidades na pá*:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega r}{u} \quad (14)$$

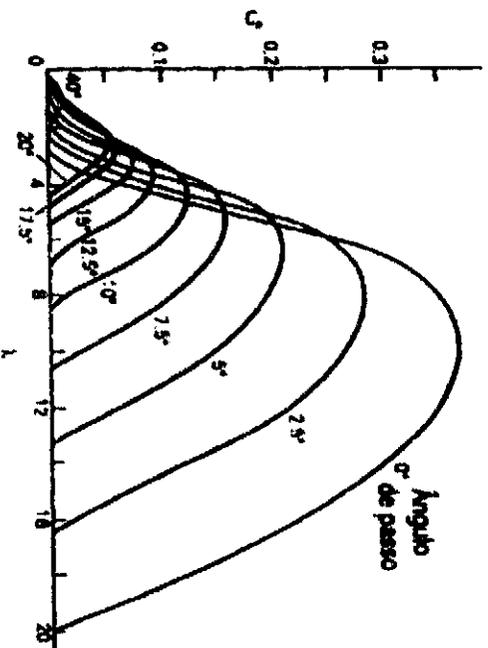


Figura 4: Efeito de ângulo de passo no rendimento da turbina. (Silva, 2002).

### 2.8.1 Característica Eléctrica do Aerogerador

As turbinas eólicas são projectadas para gerarem a máxima potência a uma determinada velocidade de vento. Esta potência é conhecida como potência nominal e a velocidade do vento a que ela é atingida é designada velocidade nominal do vento. Esta velocidade é ajustada de acordo com o regime de ventos no local, sendo habitual encontrar valores entre 12 a 15 m/s (Neumann, 2002). Devido à lei de variação cúbica da potência com a velocidade do vento, para

velocidades abaixo de um certo valor (normalmente 5 m/s) não interessa extrair energia. Uma vez obtida uma representação do perfil de ventos fiável numa base de tempo alargada, o valor esperado para energia eléctrica produtível anualmente é, no caso geral:

$$E_o \cong 8760 \int_{u_0}^{u_{max}} f(\bar{u})P(\bar{u})d\bar{u} \quad (15)$$

em que  $f(\bar{u})$  é a densidade de probabilidade da velocidade média do vento,  $P(\bar{u})$  é a característica eléctrica do sistema de conversão de energia eólica,  $u_0$  é a velocidade de cut-in e  $u_{max}$  é a velocidade de cut-out (Cunha 1972, Helmis 1995).

## 2.9 Componentes de um Sistema Eólico

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a proporcionar um maior rendimento final. Para efeitos de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes:

**Rotor:** componente responsável pela transformação de energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.

**Cabina:** elemento que contém o sistema mecânico que permite a rotação das pás e transmissão de energia mecânica ao gerador eléctrico.

**Torre:** permite o sustento e posicionamento do rotor a uma altura conveniente.

**Caixa Multiplicadora de rotação:** responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga.

**Veio:** permite a rotação das pás e transmite a energia mecânica ao gerador eléctrico.

**Pás:** permitem absorver a energia cinética do vento.

**Gerador Eléctrico:** responsável pela conversão da energia mecânica em eléctrica.

**Mecanismo de Control:** responsável pela orientação do rotor, control de velocidade, control de carga, etc.

**Sistema de Armazenamento:** responsável por armazenar a energia para produção.

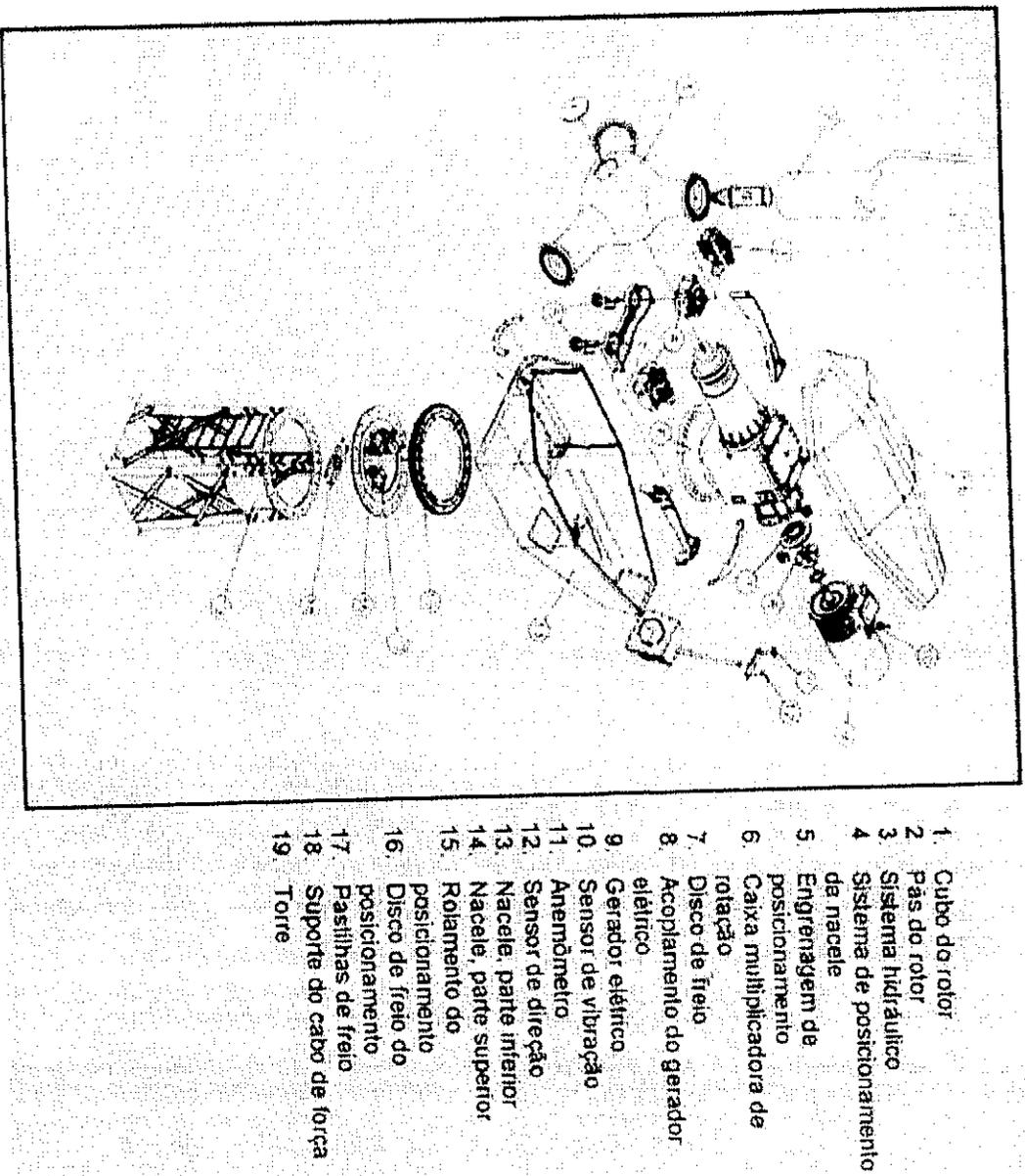


Figura 5: Apresentação das partes constituintes de um sistema eólico (Tutorial, 2004).

## 2.10 Critérios de Ligação

O principal critério técnico para localização do ponto de recepção tem a ver com o valor da potência de curto-circuito (c.c) mínima nesse ponto. Isto porque a potência de ligação do parque eólico não deve ser superior a 8% da potência de c.c. nesse ponto, de forma a não provocar grandes perturbações de tensão na rede (Tabora, 2002).

Dado que os parques eólicos se localizam em zonas de grande altitude, onde não há linhas de distribuição de energia, terão que ser constituídos ramais. Estes serão tanto maiores quanto

maior for a distância à sub-estação mais próxima, uma vez que será nesse ponto que a potência de c.c. é mais elevada. Este estudo tem de ser de tal forma a otimizar a potência instalada e os custos de construção do ramal (canalização eléctrica apartir do ponto de ligação ao ponto de recepção).

## 2.11 Gerador Eléctrico

A conversão da potência mecânica da turbina em eléctrica pode ser feita através da *máquina de corrente contínua (DC)*; *máquina síncrona* e *máquina assíncrona (ou indu-tiva)*.

Estas máquinas baseiam-se nos princípios electromagnéticos e o processo de conversão de energia é reversível. A mesma máquina pode ser usada como motor, para converter a potência eléctrica em mecânica, ou como gerador, para o caso inverso. Estes tipos de máquinas têm, no entanto, características comuns. Existe uma parte estacionária (estator) e uma parte interior rotativa (rotor), ambas construídas na base de um material magnético de elevada permeabilidade. O fluxo magnético, criado pela corrente de excitação num dos membros, passa de um núcleo para outro através de um circuito magnético, formando um caminho fechado. Devido a interacção existente entre o fluxo magnético produzido por um membro e a corrente eléctrica que circula no outro membro a conversão de energia dá-se efectivamente. Segundo Yavorski (1984) esta corrente pode ser fornecida por uma fonte exterior ou por indução electromagnética (*lei de Faraday*) dada pela expressão:

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (16)$$

onde:  $\Delta\Phi$  - variação do fluxo dado por:

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha) \quad (17)$$

$\Delta t$  - intervalo de tempo;  $\varepsilon_{ind}$  - força electro-motriz ou corrente;  $\alpha$  - ângulo entre a normal e a linha de campo;  $A$  - área útil;  $B$  - campo magnético.

### **2.11.1 Máquina de Corrente Contínua (DC)**

A máquina DC tem de converter a corrente AC em DC, o que é feito através do comutador mecânico, e este processo consiste no deslocamento de várias escovas em vários segmentos de cobre. A saída com terminal positivo está sempre ligada ao condutor que produz a tensão com polaridade positiva, sendo o raciocínio análogo para o terminal negativo.

A máquina DC convencional pode ser auto-excitada por bobinas em paralelo ou em série percorridas por corrente DC de forma a produzir um campo magnético. Este tipo de máquinas não precisam do comutador e das escovas, logo a sua fiabilidade é melhorada substancialmente.

### **2.11.2 Máquina Síncrona**

Estas máquinas funcionam a velocidades constantes relativamente à frequência fixa. Para além disso, a máquina síncrona precisa de corrente DC para excitar o campo rotórico, o que é feito através de escovas colocadas em anéis no eixo do rotor. Ao contrário da máquina assíncrona, esta máquina apresenta uma vantagem quando usada num sistema ligado a rede: não necessita da potência reactiva da rede, o que se reflecte na qualidade de potência no ponto de ligação.

### **2.11.3 Máquina Assíncrona**

A primeira vantagem da máquina assíncrona é o facto de ser uma construção resistente e sem escovas, e de não precisar de potência de campo DC à parte. As desvantagens das máquinas DC e Síncrona são eliminadas nesta máquina, resultando em menores custos de capital, baixa manutenção, e melhor desempenho transitório. Este tipo de gerador é muito usado em parques eólicos de pequenas e grandes dimensões, assim como em pequenas centrais hidroeléctricas, e está disponível para potências de vários MW (Tabora, 2002).

## **2.12 Vantagens e Desvantagens da Tecnologia Eólica**

### **2.12.1 Vantagens**

Não consome combustíveis, é limpa e abundante;

É um dos sistemas mais seguros com custo de produção competitivo;

Tem um baixo impacto ambiental e auto suficiência energética;  
Os terrenos ocupados podem ser usados para fins agrícolas;

Tem uma boa vida útil dos aparelhos por volta de 30 anos em média, uma disponibilidade de 95% e um factor de capacidade maior que 30% (Tabora, 2002).

O investimento total médio situa-se numa gama de variação entre 1000€/kw e 1500€/kw (Castro, 2003).

#### **2.12.2 Desvantagens**

Emissão de ruídos (funcionamento mecânico);

Impacto visual (sombrias em movimento);

Interferências electromagnéticas (reflexões de ondas);

Quando mal instalados podem criar migração de aves.

### **2.13 Aplicações dos Sistemas Eólicos**

Um sistema eólico pode ser usado em três aplicações distintas: *sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede* (Tutorial, 2004).

Os **sistemas isolados** são aqueles que utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Estes sistemas são aplicados no armazenamento de energia através de baterias com a finalidade de armazenar água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização; evitar que haja danos ao sistema de bateria por sobrecargas ou descargas profundas.

Os **sistemas híbridos** são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia, como por exemplo as turbinas eólicas, geradores diesel, módulos fotovoltaicos, entre outros. Estes sistemas são empregues em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários.

Os **sistemas interligados à rede** não necessitam de sistemas de armazenamento de energia.

Estes sistemas têm como vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuída tais como redução de perdas, custo evitado de expansão de rede e a geração na hora de ponta quando o regime de ventos coincide com o pico da curva de carga.

## 2.14 Metodologia

A realização do presente trabalho foi possível através dum intensa revisão bibliográfica realizada durante sua preparação. Além da revisão feita, foram usados no trabalho dados mensais da velocidade do vento, obtidos no Instituto Nacional de Meteorologia (INAM). Foram tomados para análise da variação mensal e anual do potencial eólico dados de 1973 a 1993 de três estações da zona sul de Moçambique (Maputo, Xai-Xai e Inhambane).

A escolha das três estações da zona sul do país como área de estudo para avaliação do potencial eólico, deveu-se ao facto de as mesmas serem as únicas estações com medições da velocidade do vento mais completas.

Para avaliação foram achadas as médias mensais e anuais globais da velocidade do vento e feitas as respectivas análises. Para o cálculo da potência eólica, foi usada a equação (3). Estas operações foram efectuadas considerando características de turbinas de pequena classe com diâmetros entre 6.4 a 10m de acordo com a tabela 4. Durante os cálculos foram usados os seguintes valores:

$$C_p = 0.3; \rho = 1.2kgm^{-3} \text{ e } D = 6.4m.$$

### 2.14.1 Métodos de medição do vento

O vento é caracterizado por duas grandezas variáveis em relação ao tempo, a *velocidade e a direcção*. Para medição da componente horizontal da velocidade do vento são utilizados o *anemómetro de copos, anemómetro tipo hélice e anemómetro sónico*.

Os dois primeiros consistem de dois dispositivos: o rotor e o gerador de sinal, e são usados para recolha de dados de vento real. A velocidade angular de rotação destes varia linearmente com a velocidade do vento ou com a componente do vento paralela ao eixo de rotação no caso do anemómetro tipo hélice. O anemómetro sónico é usado para recolha de dados relativos a turbulência, é mais sofisticado, e dá informação simultânea sobre a direcção e a intensidade do vento (Silva, 2002).

### 3. Resultados e Discussão

Tabela 2: Variação mensal da energia eólica na região Sul de Moçambique.

|       | Maputo   |               | Xai-Xai  |               | Inhambane |               |
|-------|----------|---------------|----------|---------------|-----------|---------------|
| Mês   | $V(m/s)$ | $P_T(Kw/m^2)$ | $V(m/s)$ | $P_T(Kw/m^2)$ | $V(m/s)$  | $P_T(Kw/m^2)$ |
| JAN   | 2.80     | 0.127         | 2.58     | 0.099         | 2.29      | 0.069         |
| FEV   | 2.61     | 0.103         | 2.27     | 0.068         | 2.33      | 0.073         |
| MAR   | 2.30     | 0.070         | 1.94     | 0.042         | 1.74      | 0.030         |
| ABR   | 2.17     | 0.059         | 1.66     | 0.026         | 1.71      | 0.029         |
| MAI   | 2.26     | 0.067         | 1.51     | 0.020         | 1.78      | 0.033         |
| JUN   | 2.25     | 0.659         | 1.48     | 0.019         | 1.51      | 0.020         |
| JUL   | 2.39     | 0.079         | 1.72     | 0.029         | 1.79      | 0.033         |
| AGO   | 2.82     | 0.129         | 2.12     | 0.055         | 2.03      | 0.048         |
| SET   | 3.01     | 0.158         | 2.78     | 0.124         | 2.45      | 0.085         |
| OUT   | 3.11     | 0.174         | 2.86     | 0.135         | 2.59      | 0.101         |
| NOV   | 2.95     | 0.149         | 2.81     | 0.128         | 2.56      | 0.097         |
| DEZ   | 2.94     | 0.147         | 2.43     | 0.083         | 2.38      | 0.078         |
| MEDIA | 2.63     | 0.160         | 2.18     | 0.069         | 2.10      | 0.058         |

Os resultados da tabela 2 mostram que a variação da velocidade do vento na zona sul de Moçambique é quase regular com valores acima da média nos primeiros dois meses e nos últimos cinco meses de cada ano, e os valores abaixo da média se registam no meio do ano. Este facto deve-se a diferença de pressão entre a superfície da terra e a das águas do mar.

Os valores máximos são atingidos nos meses de Outubro e mínimos nos meses de Abril para Maputo e Junho para Xai-Xai e Inhambane. A variação da energia é análoga a variação da velocidade do vento na mesma região em estudo.

## 4. Conclusões e Recomendações

### 4.1 Conclusões

- O vento constitui uma excelente fonte de energia natural quanto da qual é possível produzir grandes quantidades de energia eléctrica. Além de ser uma fonte de energia inesgotável, a energia eólica está longe de ser causadora de problemas ambientais.

- As velocidades médias do vento para as cidades de Maputo, Xai-Xai e Inhambane são 2.63m/s, 2.18m/s e 2.10m/s respectivamente.

Os valores médios da energia eólica para as cidades de Maputo, Xai-Xai e Inhambane são 0.1604kw/m<sup>2</sup>, 0.0704kw/m<sup>2</sup> e 0.0584kw/m<sup>2</sup> respectivamente.

- Na variação mensal da energia, verifica-se que os valores mínimos encontram-se nos meses de Abril para Maputo e Julho para Xai-Xai e Inhambane, e máximos nos meses de Junho para Maputo e Outubro para Xai-Xai e Inhambane.

- Na variação anual de energia, os anos 1982, 1992 e 1980 observaram valores máximos e os de 1991, 1986 e 1989 observaram valores mínimos para Maputo, Xai-Xai e Inhambane respectivamente.

- Os níveis de energia eólica nas três regiões da zona sul do País não permitem alimentar qualquer industria, mas com a montagem de aerogeradores de classe pequena e intermédia pode-se obter energia para satisfazer as necessidades básicas da população.

### 4.2 Recomendações

- É necessário que se tomem medidas que permitam a concretização de projectos de produção local de pequena escala, incorporando fontes renováveis e respectivas tecnologias;
- Adoptyar políticas que desencorajem ao desflorestamento, adoptar pelo uso de combustíveis alternativos e subsidiar o equipamento de energias renováveis;
- Deve ser efectuada a avaliação do potencial eólico em outras regiões do país.

## **Anexo**

Tabela 3: Variação da energia do vento em função do tamanho do aeromotor (John, 1986).

| <b>Classe</b> | <b><math>D(m)</math></b> | <b><math>P_T(kw/m^2)</math></b> |
|---------------|--------------------------|---------------------------------|
| Pequena       | 6.4                      | 8.084                           |
|               | 10                       | 0.205                           |
| Intermédia    | 14                       | 0.402                           |
|               | 20                       | 0.821                           |
|               | 25                       | 1.283                           |
| Larga         | 32                       | 2.102                           |
|               | 49                       | 4.928                           |
|               | 64                       | 8.408                           |
| Muito Larga   | 90                       | 16.626                          |
|               | 110                      | 24.837                          |
|               | 130                      | 34.690                          |

Tabela 4: Variação anual da energia eólica na região Sul de Moçambique.

| ANO          | Maputo      |               | Xai-Xai     |               | Inhambane   |               |
|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
|              | V(m/s)      | $P_T(Kw/m^2)$ | V(m/s)      | $P_T(Kw/m^2)$ | V(m/s)      | $P_T(Kw/m^2)$ |
| 1973         | 2.61        | 0.103         | 3.14        | 0.179         | 2.17        | 0.059         |
| 1974         | 2.76        | 0.122         | 2.51        | 0.092         | 1.96        | 0.044         |
| 1975         | 2.62        | 0.104         | 2.35        | 0.075         | 2.02        | 0.048         |
| 1976         | 3.10        | 0.172         | 2.25        | 0.066         | 2.35        | 0.075         |
| 1977         | 2.33        | 0.073         | 2.10        | 0.054         | 2.25        | 0.066         |
| 1978         | 2.81        | 0.128         | 2.15        | 0.058         | 2.18        | 0.060         |
| 1979         | 3.06        | 0.166         | 2.11        | 0.054         | 2.84        | 0.133         |
| 1980         | 2.38        | 0.078         | 1.73        | 0.030         | 2.96        | 0.150         |
| 1981         | 3.16        | 0.183         | 2.71        | 0.115         | 2.53        | 0.094         |
| 1982         | 3.37        | 0.221         | 2.31        | 0.071         | 2.49        | 0.089         |
| 1983         | 2.72        | 0.116         | 2.00        | 0.046         | 2.70        | 0.114         |
| 1984         | 2.74        | 0.119         | 1.51        | 0.020         | 2.62        | 0.104         |
| 1985         | 2.53        | 0.094         | 1.16        | 0.009         | 2.04        | 0.049         |
| 1986         | 2.67        | 0.110         | 1.04        | 0.007         | 1.93        | 0.042         |
| 1987         | 2.41        | 0.081         | 1.78        | 0.033         | 2.66        | 0.109         |
| 1988         | 2.48        | 0.088         | 2.55        | 0.096         | 1.82        | 0.035         |
| 1989         | 2.21        | 0.062         | 2.54        | 0.095         | 0.81        | 0.003         |
| 1990         | 1.81        | 0.034         | 2.27        | 0.068         | 1.19        | 0.010         |
| 1991         | 1.76        | 0.032         | 2.69        | 0.113         | 1.47        | 0.018         |
| 1992         | 3.13        | 0.177         | 3.27        | 0.202         | 1.57        | 0.022         |
| 1993         | 2.66        | 0.110         | 1.63        | 0.025         | 1.36        | 0.015         |
| <b>MEDIA</b> | <b>2.63</b> | <b>0.158</b>  | <b>2.18</b> | <b>0.069</b>  | <b>2.10</b> | <b>0.058</b>  |

Ano de Pesquisa

23