

**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

*Departamento de Física*

Trabalho de Licenciatura

**Distribuição Estatística do Potencial Eólico na Ilha  
de Inhaca**

**Pascoal dos Santos Saraiva**

2005



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

*Departamento de Física*

**Trabalho de Licenciatura**

**Distribuição Estatística do Potencial Eólico na Ilha  
de Inhaca**

**Autor:**

**Pascoal dos Santos Saraiva**

**Supervisor:**

**Dr. António Queface**

**Co-Supervisor:**

**Dr. Alberto Mavume**

Maputo, Outubro de 2005

---

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à memória da minha mãe Halela Box, que em vida sempre me deu apoio ensinando os seus valores, estando assim perpetuamente presente em minha vida iluminando o meu caminho.*

*Ao meu pai Almeida Alves dos Santos Saraiva.*

*Aos meus filhos Amarildo e Cátia*

*Ofereço*

## AGRADECIMENTOS

- Os meus sinceros agradecimentos vão aos meus supervisores, Dr. António Queface e Dr. Alberto Mavume, pelo apoio e por tudo quanto fizeram para a realização deste trabalho.
- Ao INAM, pelo apoio dado e fornecimento de dados e horas de internet para que este trabalho se realiza-se.
- A NISOME, pelo apoio financeiro durante o o tempo em que durou o curso e na realização deste trabalho.
- Quero ainda agradecer a todos os docentes e funcionários da Faculdade de Ciências em especial aos do Departamento de Física - Meteorologia que ao longo dos anos que durou o meu curso souberam com sacrifício e generosidade transmitir uma parte dos seus conhecimentos a mim.
- Aos doutores Ataíde, Berino e ao Eng. Feliciano pela ajuda na correcção do trabalho.
- A minha namorada Angelina, pelo apoio durante todo curso.
- Aos meus irmãos: Sandra, Beto, Chico, Elísio, Maria Luísa, Nelo, Ilda, e Nando. Pelo apoio dado durante todo percurso da vida.
- Em especial vai um agradecimento a Elvira pela paciência e educação dada aos nossos filhos durante toda minha ausência.
- Aos meus amigos, Dato, Fatha, Isaac, Alieria e outros pela ajuda material e moral dada para o sucesso deste trabalho.
- Sem citar nomes quero agradecer a todos meus colegas e amigos do curso de Física e Meteorologia que juntos compartilhamos momentos de amizade e convivência agradável, felicidade e tristeza, e a todos aqueles que directa ou indirectamente proporcionaram para a finalização do curso e o sucesso deste trabalho.

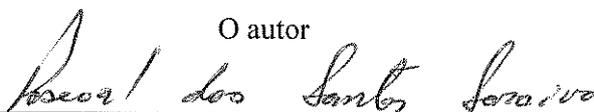
*Muito Obrigado*

## DECLARAÇÃO DE HONRA

Declaro por minha honra que o presente trabalho foi completamente realizado com base no material bibliográfico e dados que ao longo do mesmo se faz referência. As ideias originais nele expressas são da minha inteira responsabilidade e resultam do meu empenho com a principal finalidade da defesa de tese de licenciatura em Meteorologia.

Maputo, Outubro de 2005

O autor



---

(Pascoal dos Santos Saraiva)

## ÍNDICE

<b>Conteúdo</b>	<b>Páginas</b>
Dedicatória .....	i
Agradecimentos .....	ii
Declaração de Honra .....	iii
Índice .....	iv
Lista de Abreviaturas .....	vii
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de Anexos .....	ix
Resumo .....	x
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 Objectivo geral .....	2
1.2 Objectivos específicos .....	2
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>3</b>
2.1 Movimento do ar (vento) .....	3
2.2 Forças que actuam sobre o ar em movimento .....	3
2.2.1 Força gradiente de pressão .....	4
2.2.2 Força de Coriolis .....	5
2.2.3 Força centrífuga .....	6
2.2.4 Força de atrito .....	7
2.3 Tipos de vento .....	7
2.3.1 Vento geostrófico .....	7
2.3.2 Vento gradiente de pressão .....	8
2.4 Climatologia dos ventos em Moçambique .....	10
2.5 Instrumentos de medição do vento .....	11
2.5.1 Unidades de medida da velocidade do vento .....	12
2.5.2 Determinação da direcção do vento .....	12
2.5.3 Medição da velocidade do vento a superfície .....	13

2.6	Variação diurna do vento a superfície .....	15
2.7	Historial da energia eólica .....	16
2.7.1	Energia proveniente do vento .....	17
2.8	Turbinas .....	17
2.8.1	Turbinas modernas .....	18
2.8.2	Moinhos para bombear água .....	19
2.8.3	Gerador de electricidade ou aerogerador .....	19
2.9	Conceito de energia e potência .....	20
2.10	Aspectos económicos da energia eólica .....	21
2.10.1	Operabilidade dos sistemas eólicos .....	21
2.11	Energia e potencial disponível do vento .....	22
2.11.1	Energia extraída do vento .....	23
2.11.2	Área varrida pelo rotor .....	26
2.11.3	Efeito do vento com o aumento de altura (Cisalhamento do vento) .....	27
2.11.4	Levantamento do potencial eólico .....	29
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>31</b>
3.1	Fonte de dados .....	31
3.2	Avaliação do potencial eólico .....	32
3.3	Construção da rosa dos ventos .....	32
3.4	Extrapolação do potencial eólico para diferentes alturas .....	33
3.5	Potência teórica extraída do vento .....	33
3.6	Comparação do potencial eólico entre Ilha de Inhaca e Maputo .....	33
<b>4.</b>	<b>RESULTADO E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
4.1	Velocidade e direcção predominante do vento na Ilha de Inhaca .....	34
4.1.1	Variação horária da velocidade do vento .....	34
4.1.2	Variação sazonal da velocidade do vento .....	36
4.1.3	Variação horária da direcção do vento .....	37
4.1.4	Variação sazonal da direcção do vento .....	39
4.2	Avaliação do potencial eólico disponível na Ilha de Inhaca .....	44
4.3	Potência teórica extraída do vento .....	46
4.4	Comparação do potencial eólico entre a Ilha de Inhaca e Maputo .....	48

4.4.1	Distribuição da velocidade .....	48
4.4.2	Distribuição da potência .....	50
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>52</b>
5.1	Conclusões .....	52
5.2	Recomendações .....	53
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>54</b>
<b>7.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>56</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

UEM – Universidade Eduardo Mondlane  
 Mín - mínimo  
 Max - máximo  
 Var - variância  
 Cv - coeficiente de variação  
 DP - direcção predominante  
 DPM - direcção predominante mensal  
 DPA - direcção predominante anual  
 DPS - direcção predominante sazonal  
 ZCIT - Zona de Convergência Inter Tropical  
 N- Norte  
 S- Sul  
 E- este  
 O- Oeste  
 Var – Variância  
 DP- desvio padrão  
 CV- covariância

## LISTA DE SÍMBOLOS

Fp - Força gradiente de pressão	[N]
$\Delta P$ -Variação (gradiente) de pressão	N/m <sup>2</sup>
$\Delta d$ - Variação de distancia	[m]
Fc- força de Coriolis	[N]
P - Densidade do ar	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\Omega$ -Velocidade angular	(°)
$\Phi$ - Latitude	
Fc - Força centrífuga	[N]
r -raio de curvatura	[m]
v- velocidade do vento	[m/s]
Fa- Força de atrito	[N]
Tg -Tangente	
$\alpha$ -angulo formado pela velocidade do vento e o gradiente de pressão	
k- Coeficiente de atrito	
Vg -Vento geostrófico	
$\alpha$ - coeficiente de fricção do terreno	(adimensional)
m – massa	[Kg]
L –comprimento	[m]
T – tempo	[s]
Ec- Energia cinética	
P – potência	[W]
Cp - coeficiente de energia	(adimensional)

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Páginas</b>
Figura 1. Esquema da força gradiente de pressão .....	4
Figura 2. Efeitos da força de Coriolis nos Hemisférios Norte e Sul .....	5
Figura 3. Representação do vento geostrófico no Hemisfério Norte .....	8
Figura 4. Representação do vento gradiente de pressão .....	9
Figura 5. Sensor de direcção do vento .....	12
Figura 6. Anemómetro de conchas .....	13
Figura 7. Vista do anemógrafo .....	14
Figura 8. Vista de um anemómetro por cima de um mastro .....	15
Figura 9. Turbinas de eixo horizontal .....	18
Figura 10. Turbina de eixo vertical .....	19
Figura 11. Curva teórica de potência de um gerador eólico .....	24
Figura 12. Esquema ilustrativo do Teorema de Betz .....	24
Figura 13. Variação do coeficiente de energia ( $C_p$ ) .....	26
Figura 14. Variação da velocidade do vento com altura (cisalhamento do vento) .....	27
Figura 15. Vista da estação Meteorológica automática na Ilha de Inhaca .....	31
Figura 16. Variação horária da velocidade do vento na Ilha de Inhaca nos anos de 2000 e 2000 .....	35
Figura 17. Variação Mensal da velocidade do vento na Ilha de Inhaca nos anos de 2000 e 2000 .....	36
Figura 18. Rosa dos ventos no intervalo entre 06 as 17 horas durante o período do estudo ...	38
Figura 19. Rosa dos ventos no intervalo entre 18 as 05 horas durante o período do estudo ...	39
Figura 20. Rosa dos ventos do mês de Junho .....	40
Figura 21. Rosa dos ventos do mês de Setembro .....	41
Figura 22. Rosa dos ventos durante o Verão no período estudado .....	42
Figura 23. Rosa dos ventos durante o Inverno no período estudado .....	43
Figura 24. Rosa dos ventos da Ilha de Inhaca durante o período estudado .....	44
Figura 25. Variação mensal da potência eólica disponível por unidade de área .....	45
Figura 26. Variação da potência disponível dos 6 para 20 metros de altura .....	48
Figura 27. Comparação de velocidades do vento entre Inhaca e Maputo no mês de Setembro	

de 2000 .....	49
Figura 28. Potência eólica disponível as 15 horas do mês de Setembro de 2000 para Ilha de Inhaca e Maputo .....	50

### LISTA DE TABELAS

	<b>Páginas</b>
Tabela 1 – Coeficiente de fricção para vários terrenos .....	29
Tabela 2 – Médias mensais de velocidade do vento, potência eólica disponível (P), Potência teórica extraída ( $P_o$ ) para altura do anemómetro (6m) e extrapoladas para uma torre de 20 m. ....	47

### ANEXOS

Anexo 1: Velocidades médias horárias e diárias da Ilha de Inhaca de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2001.

Anexo 2: Rosa-dos-ventos mensais.

Anexo 3: Análises estatísticas feita as velocidade e direcção do vento.

## RESUMO

Este trabalho é apresentado uma análise estatística do potencial eólico e da direcção predominante do vento para Ilha de Inhaca, através da determinação diária, mensal, Sazonal e anual da característica da velocidade e direcção do vento. O objectivo desta pesquisa foi de avaliar o potencial eólico médio disponível na Ilha de Inhaca e determinação da direcção predominante do vento por meio de rosa dos ventos. Para realização deste trabalho foram utilizados dados horários de velocidade e direcção do vento, obtidos na estação meteorológica automática na Ilha da Inhaca, no período entre Janeiro de 2000 a Dezembro de 2001. Em função dos resultados apresentados neste trabalho, constatou-se que a potência eólica média na Ilha de Inhaca foi de  $28,65 \text{ w/m}^2$ , viabilizando portanto o seu uso em sistemas eólicos. Neste local, a direcção predominante do vento é de Sudoeste.

## 1. INTRODUÇÃO

Mundialmente a demanda por energia cresce numa velocidade acentuada. Devido ao acesso de maior número de pessoas a electrodomésticos e, ainda, a maioria das máquinas industriais são alimentadas por energia eléctrica. Com isto a necessidade de encontrar novas fontes de geração de energia é muito grande, pois nas fontes actuais de energia prevalece a dependência dos recursos não renováveis, que tem no petróleo a sua principal fonte de matéria-prima. Ao persistir a actual taxa de consumo, as reservas mundiais poderão se esgotar dentro de algumas décadas.

As fontes renováveis de energia mostram-se como alternativa para minimizar a actual crise no acesso a energia, principalmente nas zonas rurais onde as dificuldades de distribuição das linhas de electrificação, sobretudo no aspecto económico, são grandes e mostrando-se inviáveis (Silva et al., 2000).

Dentre as fontes renováveis de energia, tem recebido grande destaque a energia eólica, notadamente por ser “limpa” ou não poluente e de baixo custo. Entende-se por energia eólica, a energia cinética do ar em movimento (vento), que pode ser aproveitado pelo homem para realizar trabalho útil (Galdino e Silva, 2004)

O potencial eólico não deve ser analisado sob o ponto de vista de geração de electricidade, embora esta seja a contribuição mais nobre deste tipo de fonte. O vento também gera potência mecânica, que pode ser usada para o bombeamento de água e irrigação (Silva et al., 2000).

Apesar de não ser o único vector de desenvolvimento, o acesso de energia eléctrica é de fundamental importância no meio rural. Devido ao nível de carência em muitas zonas moçambicanas. As alterações no padrão de vida das famílias e do nível de renda das comunidades provocada pelo acesso à electricidade são mais integrados a outras acções, como serviço de ensino, saúde, saneamento, transporte, assistência técnica, crédito rural e agro-industrial.

Sendo assim, a inexistência de rede eléctrica, a dificuldade no abastecimento de água e a irregularidade do fornecimento de combustível em muitas regiões do País, motivam a introdução de sistemas de fornecimento de energia baseado em recurso disponível localmente, como pode ser a eólica.

Antes que sejam implementados projectos para utilização, torna-se necessário a realização de análises climatológicas dos ventos, com fim de identificar as áreas mais apropriadas para o aproveitamento de energia (Fruling et al, 2003).

A avaliação do potencial eólico de um local tem como requisito básico e indispensável, a existência de uma série temporal de observações de velocidade e direcção do vento a uma altura adequada (Silva et al., 2002).

Neste trabalho pretende-se apresentar uma análise do potencial eólico médio e a determinação da direcção predominante do vento por meio de rosa-dos-ventos, na Ilha de Inhaca. Para isso, foi usada uma série de dados horários de velocidade e direcção do vento, a 6 metros de altura, obtidos na estação meteorológica automática na Ilha de Inhaca pertencente ao Departamento de Física da Universidade Eduardo Mondlane, no período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2001.

### **1.1 Objectivos gerais:**

- Avaliar o potencial eólico na Ilha de Inhaca;
- Determinar a direcção predominante na Ilha de Inhaca.

### **1.2 Objectivos específicos:**

- Fazer a distribuição temporal da velocidade do vento;
- Construir a rosa-dos-ventos para Ilha de Inhaca;
- Avaliar o potencial eólico médio disponível no local;
- Comparar o potencial eólico entre a Ilha de Inhaca e a região da cidade de Maputo (estação observatório do INAM).

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1 Movimento do ar (vento)

A temperatura do ar na superfície terrestre é determinada pelo balanço de energia, isto é, o balanço entre a energia recebida (por radiação, transporte de calor) e da energia perdida (por radiação, transporte de calor sensível e de calor latente) e da energia armazenada (na forma de calor). A diferença entre a perda de energia origina os transportes horizontais, que actuam no sentido de anular essas diferenças.

O ar move-se principalmente como resposta a variação de pressão na atmosfera. Uma vez que a atmosfera roda no sentido antiorário, as principais correntes de ar de grandes altitudes fluem neste de oeste para este. Portanto o fenómeno de formação do vento se dá pelo aquecimento desigual que ocorre na superfície da terra. A massa de ar que apresenta temperatura maior diminui a sua densidade, essa massa de ar sobe na atmosfera. O espaço deixado pela massa é ocupado por massa de ar de maior densidade e menor temperatura, ocorrendo assim um movimento do ar.

Designa-se por vento ao movimento horizontal de ar relativamente ao Globo terrestre. Causada pela desigual distribuição horizontal da pressão atmosférica, representando uma tentativa da natureza para restabelecer o equilíbrio dessa depressão. Os movimentos verticais do ar são mais conhecidos por correntes, diz-se correntes ascendentes e correntes descendentes (Cunha, 1972).

### 2.2 Forças que actuam sobre o ar em movimento

Os movimentos atmosféricos são descritos por leis físicas fundamentais de conservação de massa, momento e energia. Nos movimentos atmosféricos de interesse, as forças principais são: força gradiente de pressão, força gravitacional e força de atrito. E forças aparentes: a força centrífuga e de Coriolis. A segunda lei de Newton pode ser expressa simbolicamente por:

$$\frac{dU}{dt} = \sum F \quad (1)$$

O lado esquerdo representa a taxa de variação da velocidade, segundo o movimento e o lado direito representa a soma de forças por unidade de massa.

### 2.2.1 Força gradiente de pressão

Devido a desigual distribuição da pressão atmosférica uma partícula de ar fica sujeita a uma força chamada força gradiente de pressão que tende mover das altas para baixas pressões, perpendicularmente às isóbaras.

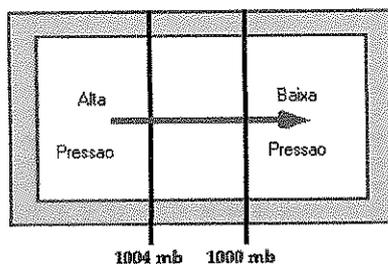
O gradiente horizontal de pressão é definido pelo decréscimo da pressão atmosférica por unidade de distância, medidas perpendicularmente às isóbaras e na direcção em que a pressão decresce com maior rapidez, o gradiente de pressão é:

- Perpendicular às isóbaras;
- dirigido das altas para baixas pressões; e
- Inversamente proporcional a distância entre isóbaras.

Consideremos uma partícula de ar entre isóbaras  $P$  e  $P+\Delta P$  Sendo a pressão uma força por unidade de área, a diferença de pressão  $\Delta P$  representa a força actuando sobre a partícula e dirigida da pressão mais alta para mais baixa. Se representarmos a distância entre as isóbaras, medido segundo perpendicular, por  $\Delta d$ , a força gradiente de pressão por unidade de volume segundo Holton (1997) é:

$$Fp = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta d} \quad (2.1)$$

Sendo, portanto inversamente proporcional a distância entre as isóbaras e directamente proporcional a diferença de pressões.



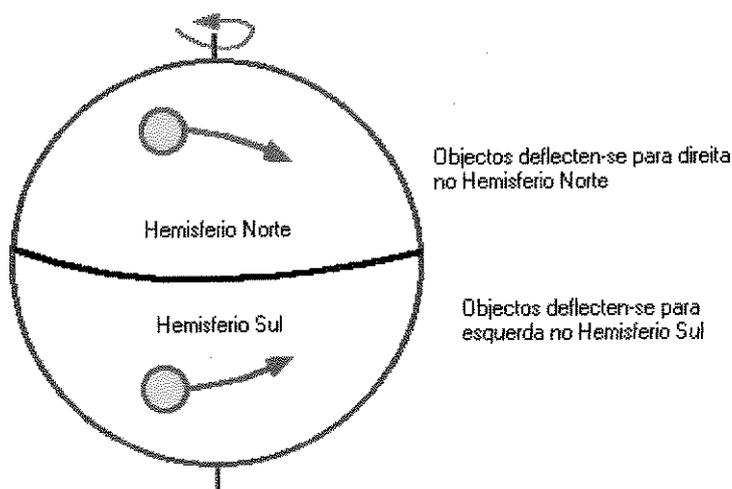
**Figura 1.** Esquema da força gradiente de pressão.  
Fonte: www.windpower.org, 2003; modificado por Saraiva (2004).

É importante notar que esta força tem o sentido oposto ao gradiente de pressão (de baixa pressão para alta pressão). A figura 1 mostra-nos uma representação esquemática da força gradiente de pressão.

### 2.2.2 Força de Coriolis

Se a terra não girasse sobre o eixo, os ventos seguiriam a direcção do gradiente de pressão. Mas devido ao movimento de rotação do planeta observa-se outro efeito sobre as partículas de ar em movimento, efeito que é conhecido por força de Coriolis ou de deflexão ou ainda força geostrófica. Esta força actuando sobre as partículas de ar logo que estas iniciam o movimento por acção da força gradiente de pressão, altera-lhes a sua trajectória, desviando-as daquela que as partículas seguiriam por efeito da força gradiente (Cunha, 1972)

A figura 2, mostra que a acção da força de Coriolis pode ser expressa pela lei de Ferrel: Qualquer objecto movendo-se horizontalmente tende a desviar-se para direita da sua trajectória no hemisfério norte e para esquerda no Hemisfério Sul. Independentemente da direcção do seu movimento.



**Figura 2.** Efeito da força de Coriolis nos Hemisfério Norte e Sul.  
Fonte: [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003; modificado por Saraiva (2004).

A força de Coriolis não é uma força real, mas sim aparente, pois não envolve nenhum ganho ou perda de energia, representando assim o resultado de dois movimentos:

- a) O movimento de rotação da terra,
- b) O movimento do corpo em relação a rotação da terra.

Devemos portanto, ter atenção que o vento observado representa sempre o movimento do ar relativo a rotação da terra (Cunha, 1972).

Demonstra-se que o efeito de rotação da terra sobre a circulação do vento é dada pela expressão, proposta por Holton, (1997):

$$F_c = 2\Omega v \sin\varphi \quad (2.2)$$

Onde  $F_c$  é a força de Coriolis por unidade de volume,  $V$  a velocidade do vento,  $\Omega$  a velocidade angular da terra ( $2\pi$  em 24h),  $\varphi$  a latitude, e  $\rho$  a densidade do meio.

Pela análise da expressão concluímos que, a força de Coriolis é máxima nos pólos ( $\sin\varphi = 1$ ) e mínimo no equador ( $\sin\varphi = 0$ ).

### 2.2.3 Força Centrífuga

Quando a trajectória da partícula de ar é curvilínea, actua também sobre ela a força centrífuga, também chamada força ciclostrófica, que pela unidade de volume se expressa pela conhecida expressão (Cunha, 1972):

$$F_c = \frac{\rho v^2}{r} \quad (2.3)$$

Onde  $\rho$  é a densidade do ar,  $v$  a velocidade do vento e  $r$ , o raio de curvatura. Esta força é em geral, de muito pequena importância sobre a direcção do vento, portanto o raio de curvatura é normalmente muito grande como se pode observar em cartas de pressão do globo.

## 2.2.4 Força de atrito

Outra força que se exerce sobre o ar em movimento é a provocada pelo atrito da superfície do globo, influenciando tanto a direcção do vento. Com efeito, a força de atrito actuando paralelamente a direcção do vento mas em sentido oposto que faz diminuir a velocidade, destruindo o equilíbrio que se verifica no vento geostrófico entre a força gradiente de pressão e de Coriolis. Como esta ultima força é proporcional a velocidade do vento é, por conseguinte, diminuída, tornando-se preponderante a força de gradiente de pressão, sendo assim, o ar é desviado ao centro de baixas pressões.

Em ambos Hemisférios, portanto, o ar converge-se para os centros de baixas pressões e diverge-se para os centros de altas pressões. No primeiro caso há também convergência e no segundo subsidência (Cunha, 1972).

Tomando em consideração a força de atrito o ângulo ( $\alpha$ ) que a direcção do vento faz com o gradiente de pressão pode ser expressa, segundo (Cunha, 1972), por:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{2\Omega \operatorname{sen}\varphi}{k} \quad (2.4)$$

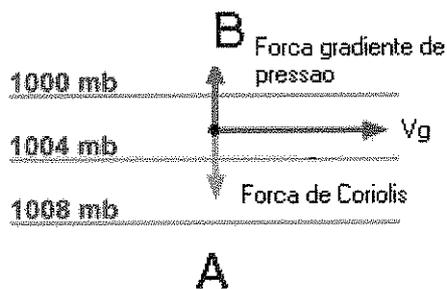
onde  $\Omega$  e  $\varphi$  tem os significados anteriores,  $k$  é o coeficiente de atrito. O efeito de atrito diminui com altura e a cerca de 1000 m, os seus efeitos são desprezíveis (Cunha, 1972).

## 2.3 Tipos de vento

### 2.3.1 Vento geostrófico

Consideremos uma massa de ar que se desloca horizontalmente a uma velocidade constante, numa região em que a força de atrito seja desprezível. As forças horizontais que se exercem sobre essa massa de ar são forças de gradiente de pressão e a força de Coriolis.

Se as intensidades dessas forças forem exactamente iguais, a força gradiente de pressão evitará que a força de Coriolis produza desvio, tanto para direita como para esquerda. O movimento deste tipo é conhecido por movimento geostrófico (Retallack, 1970). A figura 3, mostra como as forças podem equilibrar-se no Hemisfério Norte. Para o hemisfério Sul a situação é inversa.



**Figura 3.** Representação do vento geostrófico no H N.  
 Fonte: www.windpower.org, 2003; modificado por Saraiva (2004).

Devido ao facto do movimento geostrófico ser horizontal, o ar desloca-se, na realidade, ao longo de um círculo máximo. Quando o movimento é projectado numa superfície plana de uma carta sinóptica, parece processar-se segundo uma linha recta.

Para uma latitude há uma certa velocidade do vento em que a força de Coriolis contrabalança a força gradiente de pressão. Esta velocidade é conhecida por velocidade do vento geostrófico. A velocidade do vento geostrófico não pode ser determinada no equador, onde a força de Coriolis é nula. Se não se exercessem outras forças, o ar deslocar-se-ia no sentido da força gradiente de pressão, isto é, das altas para baixas pressões (Retallack, 1970).

Na realidade, a força de Coriolis é pouco intensa nas latitudes pouco elevadas e raramente se verifica a existência de movimento geostrófico entre latitudes dos 15° N e 15° S.

### 2.3.2 Vento gradiente de pressão

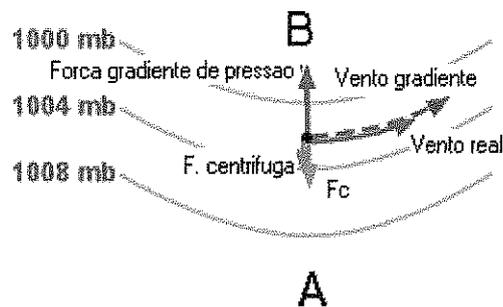
Considere de novo o movimento de uma massa de ar que se desloca horizontalmente a uma velocidade constante, numa região em que força de atrito é desprezável.

Suponhamos que, neste caso, os valores da força do gradiente de pressão e da força de Coriolis são diferentes. O movimento processar-se-á então segundo uma trajectória curva para esquerda, ou para direita, conforme o Hemisfério.

A uma dada latitude, a força de Coriolis pode ser maior ou menor do que a força gradiente de pressão, conforme a velocidade do vento.

O movimento horizontal, sem atrito, a uma velocidade constante, chama-se vento do gradiente. Isto implica que a corrente seja tangente às isóbaras de um ponto para ponto. A velocidade do vento correspondente a estas condições é a velocidade do vento gradiente (Retallack, 1970).

Quando se verifica a existência de um movimento gradiente sobre uma trajectória alongada, o ar desloca-se a uma velocidade constante na direcção das isóbaras curvas de uma carta sinóptica. Se a força gradiente de pressão for superior a força de Coriolis, o movimento em curvar-se-á em volta de uma zona de baixas pressões. O diagrama da figura 4, mostra como este fenómeno se processa no hemisfério Norte.



**Figura 4.** Representação do vento gradiente de pressão.  
Fonte: [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003; modificado por Saraiva (2004).

Nota-se que o movimento de massa de ar que se processa em sentido contrário ao do movimento dos ponteiros de relógio no hemisfério norte, porque a força de Coriolis se exerce para direita. No hemisfério sul, pelo contrário, o movimento em volta de uma zona de baixas pressões processa-se no sentido dos ponteiros de relógio. Em ambos casos, no entanto, chama-se a este movimento ciclónico. O movimento ciclónico é uma corrente que se desloca no sentido de movimento de rotação da terra.

Ao movimento de massa de ar que se verifica em torno de uma região de altas pressões chama-se, anticiclónico. Exescendo-se agora no sentido dos ponteiros de relógio no hemisfério norte e no sentido contrário no hemisfério sul.

Como é o caso do movimento geostrófico, desprezou-se o atrito. No entanto, as isóbaras são realmente curvas, pelo que o vento do gradiente constitui geralmente uma aproximação maior ao movimento real na atmosfera livre do que o vento geostrófico.

A intensidade do vento gradiente em qualquer latitude depende, não só do gradiente de pressão, mas também do raio de curvatura das isóbaras. Frequentemente, é difícil medir este raio com precisão (Retallack, 1970).

## 2.4 Climatologia dos ventos em Moçambique

O território moçambicano está situado na região do continente africano, banhado a leste pelo oceano Índico, estende-se desde 10,5° S até 27° S de latitude e desde 30° E de longitude até a costa. O clima de Moçambique é o que corresponde a situação do território na zona inter tropical (quente) e subtropical (temperado quente) do Hemisfério Sul, com as alterações resultantes dos factores fisiológicos (proximidade do mar, relevo) e dos factores eventuais que pela sua frequência ou intensidade afectam apreciavelmente o clima (Ferreira, 1965).

Durante a estação fria o anticiclone subtropical penetra no continente e estendem-se nitidamente a sua influencia até região central e Sul de Moçambique. A crista de alta pressão prolonga a influência até a região Norte do território. Nesta época, a região Sul e, com menor frequência, a região central são eventualmente atravessadas por frentes frias, as quais se segue a advecção de ar com temperatura relativamente baixa, proveniente das latitudes baixas.

Durante a estação quente, faz-se sentir a influência de depressões equatoriais, principalmente nas regiões norte e central. Na parte sul do território verificasse a alternância da influência dos anticiclones subtropicais e das depressões equatoriais, com predominância da zona de transição existente entre as depressões e anticiclones. Eventualmente, frentes frias, anticiclones móveis e depressões estacionárias, proveniente de latitudes médias invadem a região sul e por vezes a região central e Moçambique. (Mota, 1964).

O sul da zona equatorial de baixa pressão localiza-se a zona dos ventos alísios que cobre, de um modo geral, a região compreendida entre 5° e 30° S. Estes ventos, são o resultado do gradiente de pressão que existe entre células anticiclónicas subtropicais e a zona equatorial de baixas pressões. Por efeito da força de Coriolis, são desviados para esquerda no hemisfério sul, soprando por isso,

predominantemente de sudeste neste Hemisfério. Como se vê, são ventos, portanto, persistentes durante todo ano, embora tenha deslocamento sazonal.

O regime dos ventos em Moçambique é caracterizado, no Verão, por ocorrência de ventos soprando de sudeste e de leste nas regiões do centro e Sul, e de nordeste na região norte. Por outro lado, em todo território, durante os meses quentes, o vento sopra predominantemente do leste ou Sueste. Assim, as massas de ar que invadem o território provem grandemente do oceano (Mota, 1964).

Na zona litoral sul, interessa focar que para cada época, as temperaturas mais baixas ocorrem com ventos de quadrante sul, e os dias quentes ocorrem com ventos de quadrante norte ou noroeste (Mota, 1964).

Finalmente importa referir que a Ilha de Inhaca encontra-se sujeita a fortes ventos oceânicos, os quais tem grande efeito na margem leste e dunas de leste em relação a margens protegidas do norte e oeste. Na costa oeste, os ventos sopram do sudoeste e nordeste (Kalke, 1995).

## **2.5 Instrumentos de medição do vento**

O vento pode ser considerado como um vector definido por duas grandeza, a velocidade do vento e uma direcção. O valor da grandeza “velocidade vectorial do vento” é a velocidade escalar. Considera-se direcção do vento, a direcção onde ele sopra (Lonry, 1972).

Por vezes é difícil obter valores verdadeiramente representativos da velocidade e direcção do vento à superfície. O movimento do ar é afectado por factores como a irregularidade do terreno, o tipo de superfície, as fontes de calor e presença de edifícios. Quando não há movimento apreciável do ar, diz-se que se verificam condições de calma. A altura padrão dos instrumentos do vento à superfície, sobre o terreno aberto e nivelado, é de 10 metros acima do solo (Retallack, 1970).

### 2.5.1 Unidades de medida da velocidade do vento

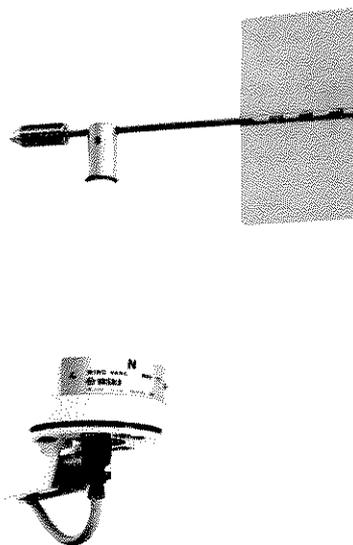
Por velocidade do vento, entende-se a distância horizontal, percorrida por uma partícula de ar durante a unidade de tempo. Ela é representada por uma velocidade média, tendo por unidades: metros por segundo (m/s), quilómetros por hora (km/h), milha terrestre por hora e nós (kt).

### 2.5.2 Determinação da direcção do vento

A direcção do vento é a direcção da qual o vento sopra. Exprime-se em graus medidos do norte geográfico, no sentido dos ponteiros do relógio. Também exprime-se em termo dos pontos da bússola (Lima, et al., 1999).

A direcção do vento à superfície é geralmente indicada por um cata-vento. Este, para funcionar correctamente, deve estar montado em apoios que reduzam o atrito ao mínimo e estar correctamente equilibrado em relação ao eixo. É também necessário ter o cuidado de assegurar que o eixo do cata-vento esteja exactamente na vertical. Além disso, deve estar correctamente orientado para o norte verdadeiro.

Actualmente são usados sensores de direcção do vento (figura 5), para a determinação da direcção do vento com uma maior precisão (Cerescer, 2003).



**Figura 5.** Sensor de direcção do vento.  
Fonte: Vaisala, 1985.

### 2.5.3 Medição da velocidade do vento a superfície

Os instrumentos utilizados na medição da velocidade do vento à superfície chamam-se anemómetros. Há dois tipos principais de anemómetros: Anemómetro de rotação e de pressão.

O instrumento de medição do vento do tipo rotativo mais vulgar é o anemómetro de conchas (Figura 6), em que há três ou mais conchas de formato especial, montadas simetricamente e formando ângulo recto com o eixo vertical. A velocidade de rotação depende da velocidade do vento, independentemente da direcção de onde ele sopra.

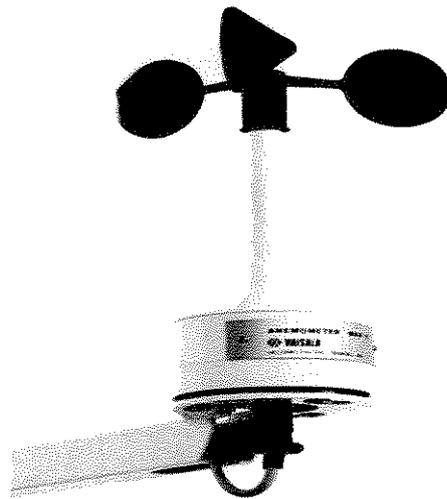


Figura 6. Anemómetro de conchas.  
Fonte: Vaisala, 1985.

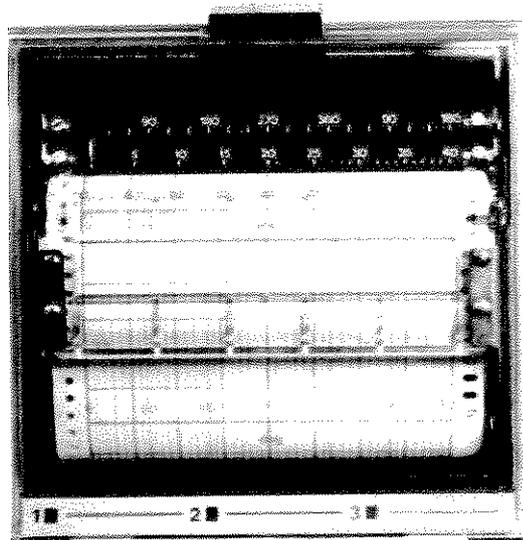
O conjunto de conchas faz mover um mecanismo contra-rotação e a velocidade do vento é calculada com o auxílio de um dispositivo de contagem, outro sistema mais conveniente, é fazer o rotor por em movimento um pequeno gerador eléctrico. A corrente produzida é então registada por um amperímetro, cuja escala se encontra calibrada em termos de velocidade do vento.

O princípio do anemómetro de pressão é o seguinte: Um cata-vento colocado no topo de um mastro mantém a extremidade aberta de um tubo voltada para o vento. O vento que sopra por esta extremidade aberta produz no seu interior um aumento de pressão que depende da velocidade do vento. Esta pressão é transmitida a um indicador por um tubo de pressão.

Imediatamente abaixo há um tubo perfurado com muitos orifícios pequenos. O vento que passa a volta do tubo reduz a pressão interior até um ponto que depende da velocidade do vento. Este efeito é transmitido ao indicador por um tubo de sucção. A combinação destes dois efeitos constitui um sistema independente de quaisquer ligeiras diferenças de pressão entre o exterior e o interior do edifício em que se encontra o registador, o anemómetro.

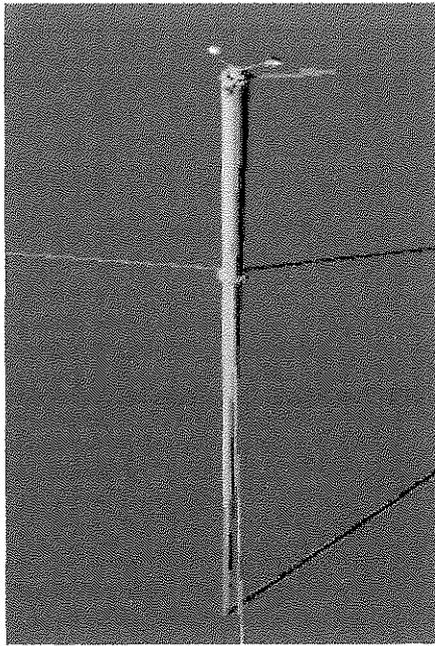
Há dois tipos para anemómetros de pressão. No tipo flutuante, de Dines a pressão de sucção é transmitida a uma câmara de flutuação de um cilindro em água, esta flutuação controla, por sua vez, o indicador.

Chama-se anemógrafo, figura 7, a um anemómetro registador que faz um registo contínuo da velocidade e direcção do vento (Retallack, 1970).



**Figura 7.** Vista do anemógrafo.  
Fonte: Vaisala, 1985.

O melhor método para a medição da velocidade do vento para o caso de necessidade de implantação de turbinas, é colocar o anemómetro no topo de um mastro figura 8, na mesma altura da torre da turbina, este método diminui a incerteza no cálculo da velocidade do vento em diferentes alturas (www.windpower.org, 2003).



**Figura 8.** Vista de um anemómetro por cima do mastro.  
Fonte: [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003

## **2.6 Variação diurna do vento a superfície**

Os locais próximos de montanhas, de vales, perto ao mar, experimentam muitas vezes acentuadas variações da direcção e velocidade do vento à superfície, quer de dia quer de noite. Estas variações chamam-se variações diurnas do vento à superfície.

Se a superfície do terreno for bastante uniforme numa região interior, ocorrem frequentemente acentuadas variações da velocidade do vento durante o dia. Essa velocidade atinge o máximo entre cerca do meio-dia e o fim da tarde, devido a transferência da quantidade de movimento dos níveis superiores para a superfície por correntes de convecção. Quando a temperatura desce, no fim da tarde, reduz-se a convecção. A velocidade do vento diminui, então atingindo o mínimo pela madrugada (Cunha, 1972).

## 2.7 Historial da energia eólica

A energia do vento é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos lugares. A utilização desta fonte energética para geração de electricidade, em escala comercial, teve início a pouco mais de 30 anos e através de conhecimento da indústria aeronáutica. Os equipamentos para geração eólica evoluíram rapidamente em termos de ideias e conhecimentos preliminares para produtos de alta tecnologia. No início da década 70, com a crise Mundial do petróleo, houve um grande interesse de países europeus à independência do petróleo e de carvão. Mais de 50.000 empregos novos foram criados e uma sólida indústria de componente e equipamento foi desenvolvido. Actualmente, a indústria de turbinas eólicas vem acumulando crescimento anuais acima de 30% e movimentando cerca de mais de 2 biliões de dólares.

Existem, actualmente, mais de 30.000 turbinas eólicas de grande porte em operação no Mundo, com a capacidade instalada da ordem de 13.500 MW. No âmbito do Comité internacional de Mudanças Climáticas esta sendo projectado a instalação de 30.000 MW, por volta de 2030, podendo tal projecção ser entendida em função perspectiva da venda do “certificado de carbono”.

Contudo, verificasse que actualmente há um incremento de utilização de motores a energia do vento, principalmente para obtenção de energia eléctrica em pequenas escala para áreas rurais, nomeadamente na Dinamarca e Grécia, no primeiro destes países não existe quaisquer recursos naturais de carvão e de petróleo e, assim, todos estes combustíveis tende ser importados. não admira, portanto, que este seja um dos países que actualmente mais se estão a se dedicar ao estudo de energia eólica por ser a única fonte significativa de energia natural do País.

A humanidade procura actualmente novas fontes de energia, e que sejam baratas, sob aspecto de esgotamento de carvão, petróleo e mesmo de minerais radioactivos dentro de poucas centenas de anos. Por este motivo, multiplicam-se os estudos científicos tendendo ao aproveitamento de inesgotáveis fontes de energia ainda não domadas, ou seja, a do vento, força poderosa em várias regiões do globo que se tende a tirar o melhor partindo sob condições adequadas (Silva et al., 2002).

### **2.7.1 Energia proveniente do vento**

Para uma alternativa do recurso do vento, o vento é talvez o mais sustentável e com um custo efectivo para aplicação na produção de energia eléctrica e em bombas de água. A energia do vento é variável no tempo e no espaço. Incluindo a componente Aleatória que contribui em pequena parte para sua total variância.

Esta, em vez de combustíveis fósseis, o recurso do vento varia com tempo do dia e a época do ano, e também se estende de ano para ano. Comparando com a energia solar, o vento é mais sensível à variação com a topografia e padrões de tempo. Estas propriedades fazem com que a avaliação deste recurso, caracterize que o vento é recurso de energia mais importante (Houghton, 1985).

O parâmetro mais importante para o cálculo do investimento, é o conhecimento dos recursos eólicos do local. Teoricamente a energia produzida varia directamente com o quadrado da velocidade média do vento e a potência varia com o cubo da velocidade. Na prática, a potência produzida por um aerogerador varia com a velocidade do vento, segundo a curva de potência do mesmo gerador e a energia será o integral da potência produzida durante o tempo que estiver em funcionamento (Houghton, 1985).

## **2.8 Turbinas**

A turbina é o elemento mecânico que transforma a energia cinética do vento em rotação. O eixo em rotação está acoplado a um dínamo que transforma a energia eólica em energia eléctrica.

As turbinas do vento capturam a energia cinética do vento em um rotor que consiste em duas ou mais lâminas acopladas mecanicamente a um gerador eléctrico. As turbinas são montadas no alto da torre para facilitar a captura da energia. Inúmeras turbinas são instaladas num local constituindo parques eólicos para aumentar a capacidade de produção de energia. Obviamente, locais com velocidades de vento estáveis produzem muita energia durante o ano (Patel, 1999).

O uso de turbinas eólicas para gerar electricidade começou na Dinamarca nos finais do século passado e tem se estendido para todo mundo. Pequenas turbinas de vento geradoras de

electricidade abasteciam numerosas comunidades rurais nas décadas dos anos 30. Quando os EUA estendiam a rede eléctrica ([www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003).

### 2.8.1 Turbinas Modernas

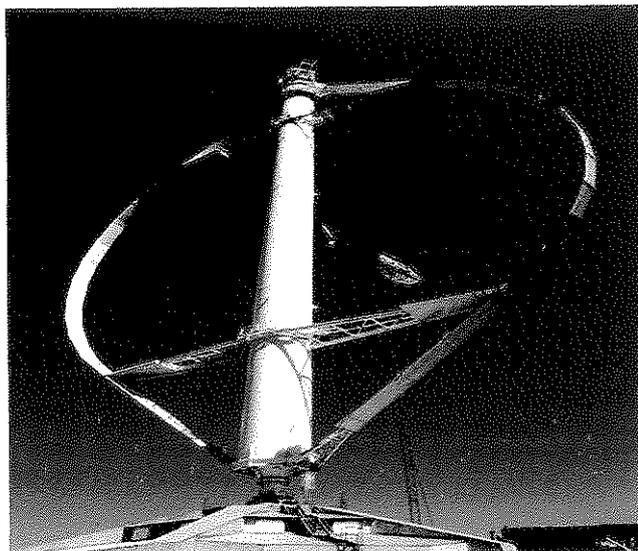
As turbinas de vento modernas de vento movem-se pelo seguinte procedimento: O arraste, quando o vento empurra a hélice e elevação, no qual as hélices se movem de mesmo modo que as asas de avião através da corrente de ar.

As turbinas de vento podem classificar-se em turbinas de eixo horizontais (figura 9) e de eixos verticais (figura 10) com os eixos perpendiculares ao solo. As turbinas de eixo horizontal utilizadas para gerar electricidade tem de uma a três hélices, mas as utilizadas para bombear agua podem ter mais hélices.

Entre as máquinas de eixo vertical mais utilizadas destacam-se os savanios que o nome provem dos seus desenhadores, e se empregam sobre tudo para o bombeio; e Darrieus, uma maquina de alta velocidade que se assemelha a uma bateadeira de ovos.



**Figura 9.** Turbinas de eixo horizontal.  
Fonte: [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003



**Figura 10.** Turbina de eixo vertical.  
Fonte: [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003

### **2.8.2 Moinhos para bombear água**

Estas máquinas são dispositivos puramente mecânicos, nos quais o rotor, geralmente do tipo multipás, é acoplado a um eixo de manivelas horizontal que transforma o movimento rotativo em um movimento linear, o qual por meio de uma longa haste metálica vertical acciona uma bomba de água submersa do tipo pistão. No caso de bombeamento de água de poços, o equipamento é montado directamente acima do solo. Estes moinhos tem um elevado momento de torção e baixa velocidade. São frequentes em zonas rurais e se empregam para drenar água do subsolo.

### **2.8.3 Gerador de electricidade ou aerogerador**

É o nome que se da a uma maquina capaz de transformar a energia cinética do vento em energia eléctrica para o uso em diversas aplicações (Galdino e Silva, 2004).

Os cientistas calculam que 10% da energia eléctrica mundial se poderia obter de geradores de energia eólica nos meados do século XXI. Os geradores que se usam actualmente proporcionam 660 quilowatts, com torres de 35, 40, 45 e 50 de altura e 39, 42, 44 de diâmetro de hélice ([www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003).

Os geradores de turbina de vento tem várias componentes, o rotor converte a energia do vento em energia rotatória do eixo, uma caixa de engrenagens aumenta a velocidade e um gerado que transforma a energia mecânica em energia eléctrica.

Em algumas máquinas de eixo horizontal a velocidade das hélices pode ajustar-se e regular-se durante o funcionamento normal, assim como parar em caso de movimento excessivo. Outros têm um freio aerodinâmico que com ventos fortes reduz a sua velocidade. Um mecanismo de direcção “yaw control” orienta continuamente a turbina na direcção do vento (Patel, 1999).

Dados experimentais na Holanda, Alemanha, Dinamarca e reino Unido nos últimos três anos, mostram que os sistemas eólicos instalados actualmente com velocidades médias de 4,7 m/s produzem 800 kilowatt-hora por metro quadrado, com 5 m/s produzem 1000 kilowatt-hora por metro quadrado (www.windpower.org, 2003).

## **2.9 Conceito de energia e potência**

Os físicos definem a palavra energia como a quantidade de trabalho que um sistema físico é capaz de produzir. De acordo com as definições dos físicos, não pode ser criada, nem consumida.

A energia pode ser convertida em diferentes formas: A energia cinética de movimento das moléculas de ar pode ser convertidas em energia rotacional pelo rotor de uma turbina eólica, em cada conversão de energia proveniente da fonte é convertida em energia calorífica (www.windpower.org, 2003).

Dado que a maioria das turbinas eólicas produzem electricidade, podemos medir a produção em termos de quantidade de energia eléctrica que são capazes de converter a partir da energia cinética do vento. Podemos medir esta energia em termos Kw/h (kilowatt-hora) e Megawatt-hora (Mw/h) durante um certo período de tempo, uma hora ou um ano. A energia não se mede em Kw mas sim em Kwh.

A potência mede-se em watts (w) ou Kw. A potência é transferência de energia por unidade de tempo. A potência pode ser medida em qualquer instante de tempo enquanto a energia deve ser medida durante um certo período de tempo exemplo ano, hora, ano.

Um gerador que tem uma potência nominal de 100 Kw (na placa de características), ele indica que produzirá 100Kwh de energia por hora de funcionamento, quando trabalha com o rendimento máximo (www.windpower.org, 2003)

Que um País tenha um 1000 Mw de potência eólica instalada não lhe indica quanta potência produzem as turbinas. Os aerogeradores estarão girando 75% das horas de ano, onde estarão a extrair a potência nominal durante um número limitado de horas de ano.

## **2.10 Aspectos económicos da energia eólica**

O uso de energia é totalmente viável nos locais onde os ventos são favoráveis uma vez que a viabilidade de tais empreendimentos esta condicionada à velocidade dos ventos no local.

No caso dos sistemas isolados de pequeno porte a viabilidade é obtida naturalmente para velocidade de vento baixas, pois deve-se comparar os custos dos sistemas eólicos com os elevados custos de extensão da rede eléctrica convencional.

No caso de fazendas eólicas, a viabilidade só se alcança para velocidades de ventos elevadas, pois tem de competir com os custos de energia obtidos as formas de geração convencional (hidroeléctrica e térmica).

Nos locais favoráveis, os investimentos em energia eólica são bastante rentáveis e têm sido explorado em todo mundo pela iniciativa privada. Em alguns países (Dinamarca e Alemanha) a energia eólica já é complementar à geração convencional e tem participação expressiva na matriz energética nacional (Galdino e Silva 2004).

### **2.10.1 Operabilidade dos sistemas eólicos**

A operabilidade do sistema é dada em percentagem e representa o tempo de funcionamento do sistema desde que a velocidade do vento seja superior à velocidade mínima de arranque. Para aplicação em larga escala com máquinas de grande porte se requer uma velocidade média de, no mínima de 4,5 a 6,5m/s, para que os sistemas sejam economicamente viáveis. já para sistemas

isolados pequenos, incluindo os sistemas mecânicos de bombeamento de água, assumisse que 3 m/s é o mínimo admissível (Sousa, 1993), citado por (Fruling et al., 2003).

## 2.11 Energia e potencial disponível no vento

A energia cinética contida no vento é proporcional ao quadrado da sua velocidade. A potência disponível no vento é proporcional ao cubo da sua velocidade. Portanto, pequenas variações, para mais, do vento de um local para outro, em uma mesma área podem levar a um grande aumento de potência obtida com a turbina eólica, Dai a necessidade de escolha criteriosa do local de instalação (www.hakaram.freeyellow.com, 2001)

A potência de um aerogerador, depende da superfície varrida pela hélice e, portanto, de comprimento das pás e é independente do número de pás.

A energia que origina o vento é a energia cinética devido a massa de ar em movimento (Patel, 1999)

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.5)$$

Onde  $m$  é a massa em kg e  $v$  a velocidade em (m/s)

$$\text{A massa é dada por: } m = \rho V \quad (2.6)$$

Onde  $\rho$  é a densidade de ar com o valor de 1,225 kg/m<sup>3</sup> segundo Holton (1997) e  $V$  o volume do cilindro varrido.

$$\text{O volume do cilindro varrido é: } V = AL \quad (2.7)$$

onde  $A$  é a superfície varrida e  $L$  o comprimento do cilindro, que é um espaço e portanto é igual a uma velocidade (do vento) por um tempo (em segundo)

$$L = vt \quad (2.8)$$

logo

$$Ec = \frac{1}{2} \rho V v^2 = \frac{1}{2} \rho A v t v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad (2.9)$$

portanto, a potência teórica do vento será:  $Pt = \frac{Ec}{t} = \frac{1}{2} \rho A v^3$  (2.10)

Massa da coluna  $\rho A v$ , Energia cinética  $\frac{1}{2}(\rho A v)v^2$

Um método de caracterização da energia eólica em vários lugares de interesse é via energia por unidade de área (densidade de energia), dado por:

$$\frac{P}{A} = 0.5 \rho v^3 \quad (2.11)$$

Se a área varrida transversalmente pelo vento é circular, como ocorre em todas máquinas eólicas de eixo horizontal:

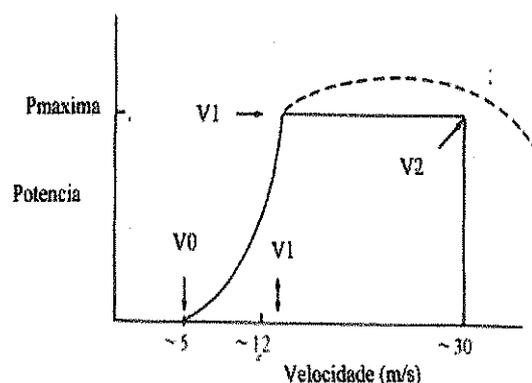
$$A = \frac{PD^2}{4} \quad (2.13)$$

sendo D o diâmetro, pelo que a potência disponível será:

$$Pd = \frac{1}{8} P \rho D^2 v^3 \quad (2.14)$$

### 2.11.1 Energia extraída do vento

A relação entre a potência do vento utilizável e a velocidade do vento é de forma similar a figura 11. De acordo com a curva, a potência gerada é zero até que a velocidade do vento atinja um valor crítico e a partir deste valor a potência gerada aumenta com o aumento da velocidade do vento até que a mesma seja igual ao valor máximo entre V1 e V2 e fora de V2 a potência gerada é cortada a zero. V0 é chamada velocidade de arranque ou operacional; V1 é a velocidade máxima constante e V2, a velocidade nula (Twidell e Weir, 1986).

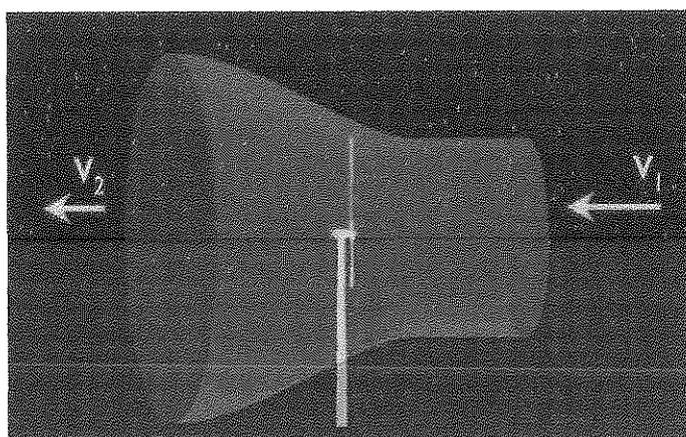


**Figura 11.** Curva teórica da potência de gerador eólico.  
Fonte: Twidel e Weir, 1986; modificado por Saraiva (2005).

A energia extraída pelas hélices é geralmente expressa como a função do vento antes de alcançar o rotor, como se segue:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \quad (2.15)$$

Onde  $C_p$  é a fracção da energia do vento antes da hélice, que é capturado pelo rotor. A energia restante é perdida pelo vento depois da hélice. A figura 12, ilustra o processo de perda de energia do vento. O factor  $C_p$  é chamado coeficiente de energia do rotor ou coeficiente do rotor.



**Figura 12.** Esquema ilustrativo do teorema de Betz.  
Fonte: [www.windpower.org](http://www.windpower.org), 2003

Na figura 12,  $v_1$  é a velocidade do vento antes de alcançar a turbina e  $v_2$  a velocidade após a turbina. Isto é  $\frac{(v_1 + v_2)}{2}$ .

A massa da corrente de ar através do rotor durante um segundo é:

$$m = \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (2.16)$$

Onde:  $m$  é a massa por segundo,  $\rho$  a densidade do ar,  $A$  é área varrida pelo rotor e  $\frac{(v_1 + v_2)}{2}$  é a velocidade média do vento através da do rotor. A potência do vento extraída pelo rotor é igual a massa pela diferença de quadrados das velocidades do vento.

$P = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_2^2)$  Substituindo nesta expressão o  $m$  pela sua expressão teremos:

$$P = \frac{1}{2} \rho A \frac{(v_1 + v_2)}{2} (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.17)$$

Agora comparemos o mesmo resultado com a potência total de uma corrente de ar não perturbada através da mesma área sem o rotor bloquear o vento. Chamemos a esta Potência  $P_0$ .

$$P_0 = \frac{\rho}{2} v_1^3 A \quad (2.18)$$

A relação entre a potência que extraímos do vento e a potência do vento sem se perturbar é:

$$\frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \left( \frac{v_2}{v_1} \right) \right] \quad (2.19)$$

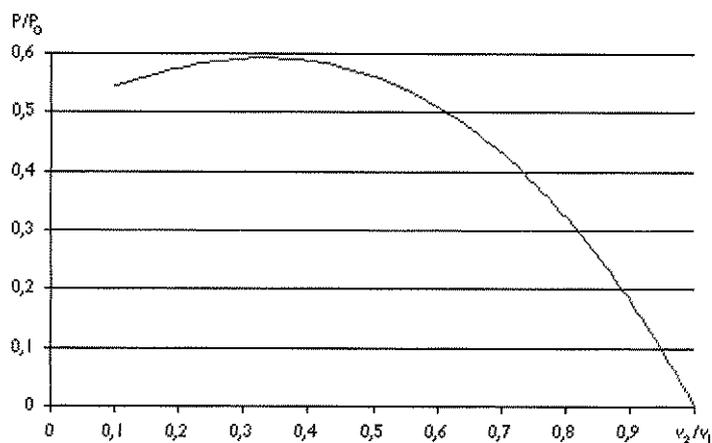
Pudemos expressar  $\frac{P}{P_0}$  em função  $\frac{v_2}{v_1}$

De acordo com a figura 13, A função alcança o valor máximo quando  $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ , o valor a qual a potencia extraída pelo vento é 0,59 vezes ou  $\frac{16}{27}$  da potência do vento.

O máximo valor de  $C_p$  é 0,59 quando  $\frac{v_2}{v_1}$  é 1/3. A máxima energia é extraída quando a velocidade do vento depois da turbina é 1/3 da velocidade do vento antes da turbina. Nessas condições:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \rho A v^3 0,59 \quad (2.20)$$

O maior valor de  $C_p$  é 0,59 (Lei de Betz). Na prática, o valor tem sido menor que 0,5 para ventos de alta velocidade, figura 13 segundo Patel (1999).



**Figura 13.** Variação do coeficiente de energia  $C_p$ .  
Fonte: Patel, 1999.

### 2.11.2 Área varrida pelo rotor

Foi vista na equação de energia, a energia extraída na turbina varia linearmente com a área varrida pelo rotor. Para as turbinas de eixo horizontal a área varrida é dada por:

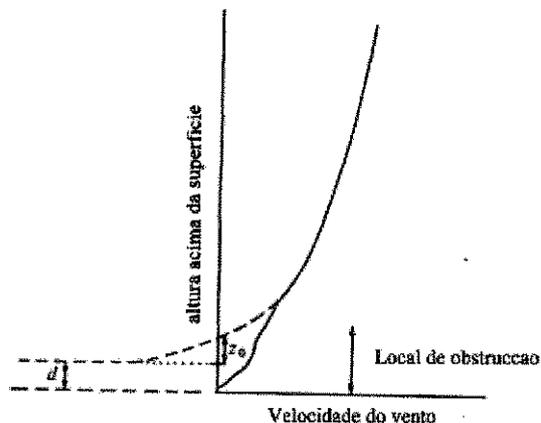
$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.21)$$

onde  $D$  é diâmetro do rotor.

### 2.11.3 Efeito do vento com aumento de altura (Cisalhamento do vento)

A velocidade do vento varia consideravelmente acima da superfície do solo. Isto é chamado cisalhamento do vento. Uma máquina com altura da torre de 30 m, experimentará ventos fortes em relação a altura de uma pessoa.

A figura 14, Mostra a variação da velocidade do vento com altura  $Z$  a uma camada limite até próximo da superfície até cerca de 100 m. Para  $Z = 0$  a velocidade do vento é sempre zero.



**Figura 14.** Variação da velocidade do vento com altura (cisalhamento do vento).  
Fonte: Twidel e Weir, 1986; modificado por Saraiva (2004).

Dentro da altura do local de obstrução a velocidade aumenta irregularmente, e grandes flutuações em direcção podem ocorrer em ventos altos. Acima da região irregular, o perfil da velocidade com altura é dada pela expressão:

$$z - d = z_0 \exp\left(\frac{v_z}{v}\right) \quad (2.22)$$

Consequentemente

$$V_z = V \ln\left(\frac{z - d}{z_0}\right) \quad (2.23)$$

Onde  $d$  é o o plano zero deslocada com magnitude inferior a altura de obstrução,  $Z_0$  é o comprimento da rugosidade e  $V$  a característica da velocidade.

Todavia, o aspecto mais importante para o bom funcionamento da turbina é o grau de obstrução do local e se ter a certeza que o disco da turbina receberá ventos fortes sem flutuações irregulares.

O melhor lugar para obtenção de boa energia do vento São os topos da colina com um acabamento liso. Por outro lado o vento deve incidir do lado da superfície da água ou terreno liso em varias centenas de metros (Twidel e Weir, 1986).

Muitas turbinas de vento instalam-se a uma altura de 5 a 50 m (Twidel e Weir, 1986). Isto é comum porque as medições meteorológicas da velocidade do vento  $V_s$  são dadas na altura de 10 m, a expressão usada para determinar a velocidade  $V_z$  a altura  $Z$  é:

$$V_z = V_s \left( \frac{z}{10m} \right)^\alpha \quad (2.24)$$

para o caso em que as leituras não sejam feitas a altura de 10 m a expressão adequada será:

$$V_z = V_s \left( \frac{Z}{Z_s} \right)^\alpha \quad (2.25)$$

Onde:

$V_z$  é Velocidade do vento na altura  $Z$

$V_s$  Velocidade do vento medida na altura  $Z_s$

$\alpha$  é Coeficiente de fricção da superfície do terreno. O coeficiente de fricção é baixo para terreno liso e alto para terrenos rugosos. A tabela abaixo apresenta o coeficiente de fricção para vários terrenos.

**Tabela 1.** Coeficiente de fricção para vários terrenos.

Tipo de terreno	Coeficiente de fricção ( $\alpha$ )
Lago, oceano e solo duro e liso	0.10
Solo com relva a nível do pé	0.15
Arbustos e colheitas altas	0.20
Local com muitas arvores	0.25
Cidade com algumas arvores e arbustos	0.30
Área de cidade com edifícios altos	0.40

Fonte: Patel, 1999; modificado por Saraiva 2004

#### 2.11.4 Levantamento do Potencial eólico

O primeiro passo a ser seguido no estudo de viabilidade de um sistema de energia eólica é verificar o potencial eólico do local de implantação. Deve-se ter informação suficiente e confinável sobre a intensidade e regularidade do vento no local. Estas informações são necessárias ao acordo do dimensionamento do sistema. Se o lugar não apresentar ventos com intensidade e regularidade suficiente, deve-se estudar a implantação de outro tipo de fonte de energia.

O valor médio e o valor cúbico médio de velocidade do vento segundo Houghton (1985), Frulling et al. (2003), pode ser calculado por:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \int v dt \quad [\text{m/s}] \quad (2.26)$$

$$\langle v^3 \rangle = \sqrt[3]{\frac{1}{T} \int v^3 dt} \quad [\text{m/s}] \quad (2.27)$$

As equações discretas equivalentes a 2.26 e 2.27 são dadas por:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \sum v_i \Delta t_i \quad (2.28)$$

$$\langle v^3 \rangle = \sqrt[3]{\frac{1}{T} \sum v_i^3 \Delta t_i} \quad (2.29)$$

Onde  $\Delta t_i$  é o tempo da  $i$ -ésima amostra.

$T = \sum \Delta t_i$   $i = 1, 2, 3, \dots, n$  sendo  $n$  o número de amostra.

Na prática, somente as equações 2.28 e 2.29 são aplicadas. Pois as medidas de velocidade do vento são tratadas discretamente. Desde que a potência do vento deve ser estimada a partir do valor médio cúbico. É ainda importante notar a igualdade dada por:

$$\langle v^3 \rangle \geq \langle v \rangle \quad (2.30)$$

Se for usado o valor médio da velocidade no cálculo da potência, será obtido um valor menor ou igual a potência real do vento. Portanto, o uso do valor médio pode levar ao sobredimensionamento do sistema. A rigor, para se obter o valor real da potência média do vento, deve-se usar o valor médio cúbico.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

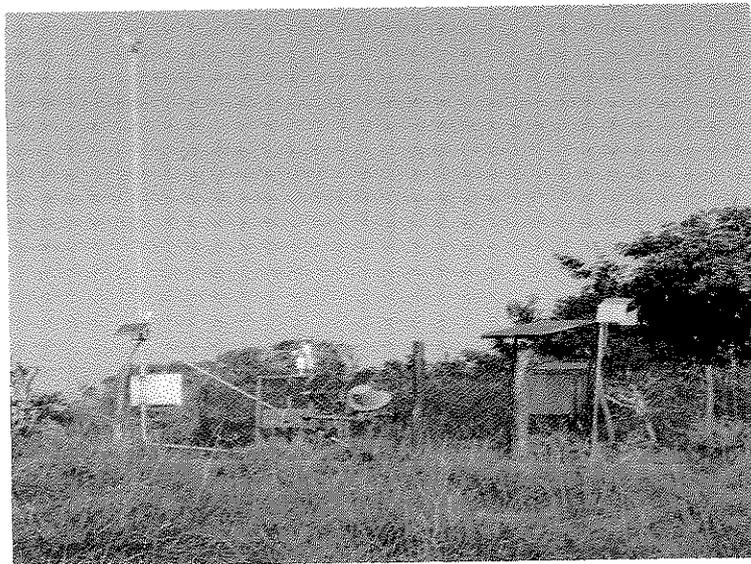
#### 3.1 Fonte de dados

Para a realização deste trabalho, foram utilizados dados de velocidade e direcção horárias do vento, colectados na estação meteorológica automática da Ilha de Inhaca pertencente ao departamento de física da Universidade Eduardo Mondlane figura 15, no período de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2001.

A Ilha de Inhaca localiza-se a 32 km a leste da Cidade de Maputo na latitude de 26° S e longitude 33° E (Kalke). Tem uma superfície de 42,5 Km<sup>2</sup> e cerca de 5.300 habitantes.

Para comparação do potencial eólico, foram utilizados dados sinópticos de velocidade do vento obtidos no INAM, estação de Maputo observatório do ano 2000.

Para a análise estatística dos dados foi usada a planilha electrónica *Sigma plot 6.0* e *Excel*. Para a elaboração da rosa dos ventos foi usado um programa em *MATLAB 6.5* “Wind Rose plot” adaptado por Kristy Ross (Outubro 2004).



**Figura 15.** Vista da estação Meteorológica automática na Ilha de Inhaca.  
Fonte: Queface, 2000.

### 3.2 Avaliação do potencial eólico

A velocidade do vento é o dado mais importante para avaliar o potencial eólico de um local. É de referir que o vento não é estável em todos locais. Este é influenciado pelos sistemas de tempo, o terreno do local, e a altura acima da superfície do solo. A velocidade do vento varia por minuto, hora, dia, mês, e ano (Twidell & Weier, 1986).

Com base na velocidade média horária, Conforme proposto por Fruling et al (2003), calculado pelo total horário acumulado, foram obtidas as médias diárias, mensais e anuais.

A partir das velocidades médias diárias, utilizando-se a equação 2.11, obteve-se diariamente, as potências eólicas disponíveis por unidade de área e suas respectivas médias mensais e anuais.

### 3.3 Construção da rosa dos ventos

Para determinar a direcção predominante do vento, foi construída rosa-dos-ventos que é um método para apresentar as distribuições de frequência de velocidade e direcção, num mesmo diagrama (Lonry, 1972).

Para a elaboração das rosa dos ventos foi usado um programa em matlab “Wind Rose plot” adaptado Kristy Ross (Outubro 2004). Para tal, foram criados ficheiros no formato “tab-delimited”, onde a primeira coluna pertence a direcção do vento e a segunda coluna a velocidade do vento.

A rosa dos ventos resultante neste programa é distribuída em 16 rumos. Segundo a orientação dos pontos cardeais (Norte, Sul, Este e Oeste), colaterais (Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste) e subcolaterais (Norte-nordeste, Leste-nordeste, Este-nordeste, Sul-sudeste, Sul-sudoeste, Oeste-sudoeste, Oeste-noroeste e Norte-noroeste).

### 3.4 Extrapolação do potencial eólico para diferentes alturas

Para melhorar o ganho de potência em máquinas eólicas, recorre-se ao método de aumento de altura de captação com vista a experimentar ventos mais fortes.

Para qualquer fluido em movimento a velocidade do vento aumenta à medida em que este se afasta da superfície que o delimitam. Portanto, a velocidade do vento aumenta com altura de acordo com a expressão 2.25, dependendo da rugosidade. No presente trabalho, foi usado o coeficiente de fricção ( $\alpha$ ) de 0.20, visto que esta região (Inhaca) se apresenta com arbustos.

Para avaliar como o potencial pode aumentar ao se afastar da superfície do solo, as médias diárias de velocidade do vento foram extrapoladas para uma altura de 20 metros.

### 3.5 Potência teórica extraída do vento

A determinação do potencial eólico fornece informação necessária ao planeamento e utilização dessa fonte. Nem todo potencial energético do vento pode ser utilizada. Porém, apenas uma fracção desse potencial poderá ser realmente convertida em trabalho útil por uma máquina.

A potência extraída pelo rotor foi determinada pela equação 2.14.  $C_p$  é a fracção da energia do vento que é captada pelo rotor. O máximo valor de  $C_p$  é de 0.59, este valor não leva em conta as perdas aerodinâmicas no rotor, a variação da velocidade nos vários pontos da área de captação, o tipo de rotor e outras variáveis. Assim, neste trabalho usou-se uma eficiência de 0,4 (Patel, 1999).

### 3.6 Comparação do potencial eólico entre a Ilha de Inhaca e Maputo

Para a comparação do potencial eólico, foram utilizados valores que melhor representariam o período de máximas velocidades. Na estação observatório de Maputo, os registos da velocidade do vento são feitos em horas sinópticas, isto é, 09, 15 e 21. Para uniformizar os dados, foram seleccionadas as velocidades do vento das 15 horas do mês de Setembro de ambas estações.

Com base nestes dados foram calculados médias, mínimos e máximos valores de velocidade e as respectivas potências (Wilks, 1995).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Velocidade e direcção predominante do vento na Ilha de Inhaca**

Neste capítulo são apresentados os resultados da análise do potencial eólico e da direcção predominante do vento na Ilha de Inhaca. Estes resultados foram obtidos a partir das velocidades e direcções horárias do vento no período entre Janeiro de 2000 a Dezembro de 2001.

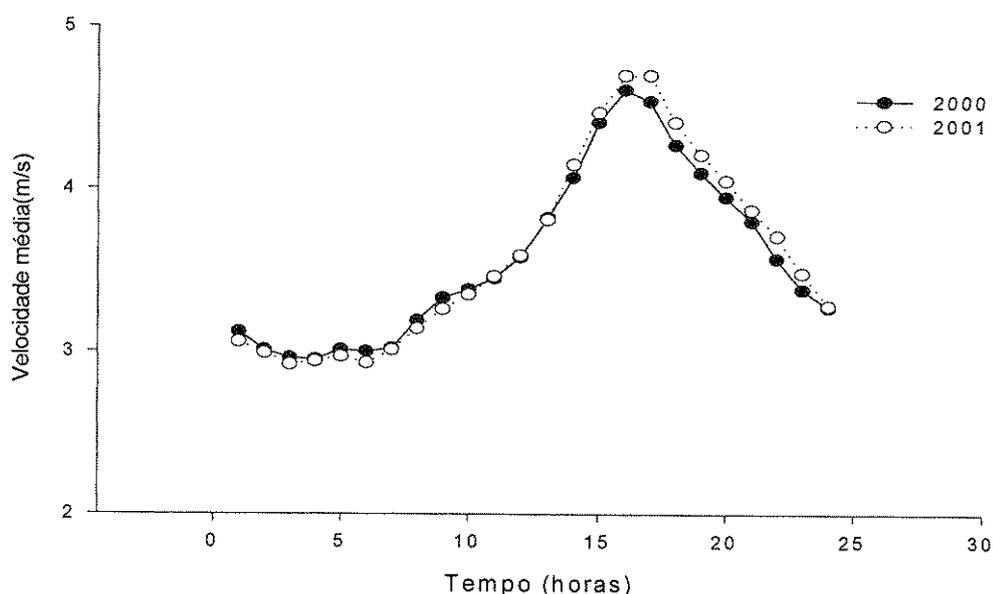
Com base nas velocidades e direcções horárias do vento, foram calculadas as médias diárias, mensais sazonais e anuais. Os resultados correspondentes a velocidade do vento são apresentados em tabelas e gráficos enquanto que a direcção se apresenta na forma de rosa-dos-ventos, com 16 rumos.

#### **4.1.1 Variação horária da velocidade do vento**

A figura 16 mostra a distribuição horária da velocidade do vento na Ilha de Inhaca para os anos 2000 e 2001. Neste gráfico se observa que a velocidade cresce durante o período diurno, enquanto que durante a noite a velocidades decresce. A velocidade atinge o máximo diário entre as 16 e 17 horas (a tarde) com uma magnitude de cerca de 4,7 m/s enquanto que os valores mínimos se registam as 1 e 3 horas da madrugada com valores de cerca de 2,9 m/s, para os anos 2000 e 2001 respectivamente.

Por outro lado, observa-se que os maiores valores de velocidade se concentram no intervalo entre as 14 e 19 horas com ventos superando os 4 m/s, enquanto as menores velocidades concentram-se entre 1 as 4 horas com velocidades de magnitude abaixo dos 3 m/s.

Analizando as duas curvas correspondentes a variação horária da velocidade do vento no período estudado (2000 e 2001), verifica-se que elas apresentam comportamentos similares. As velocidades médias horárias durante este período se apresentam no anexo 1.



**Figura 16.** Variação horária da velocidade do vento na Ilha da Inhaca nos anos de 2000 e 2001.

Estes resultados estão de acordo com o regime diário dos ventos segundo Cunha (1972), no qual, a velocidade do vento aumenta no período da tarde e atinge um mínimo na madrugada. Isto deve-se ao facto que durante a tarde, com o aumento da temperatura, a massa de ar que apresenta maior temperatura diminui a sua densidade, essa massa de ar sobe na atmosfera. O lugar deixado é ocupado por massa de ar de maior densidade e menor temperatura, fazendo com que haja maior circulação.

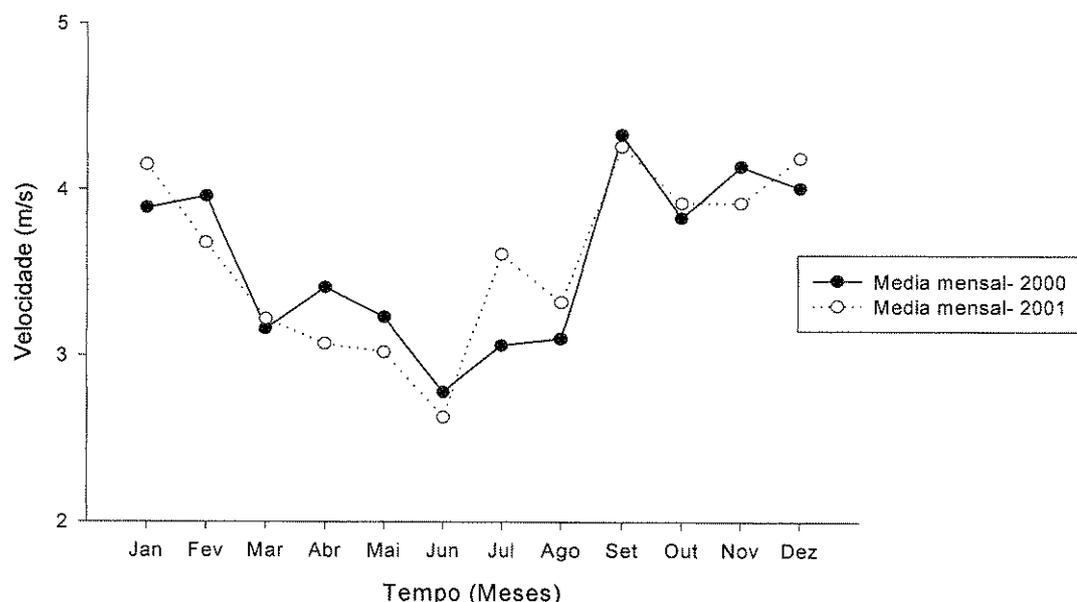
Este facto é explicado por Trewartha (1958) citado por Cunha (1972), deve-se ter presente que o vento aumenta, em geral com altitude, durante o período diurno as correntes convectivas causadas pelo aquecimento da superfície do globo provocam uma troca de ar entre níveis mais baixos e níveis mais altos, do que resulta uma distribuição mais uniforme da velocidade vertical e, conseqüentemente aumenta a velocidade a superfície. Durante a noite, o ar da vizinhança do solo é arrefecido, tornando-se mais acentuado o efeito do atrito e o vento então diminui de velocidade.

#### 4.1.2 Variação Sazonal da velocidade do vento

A análise da variação sazonal da velocidade do vento é apresentada na figura 17, por um lado se observa que a velocidade média mensal máxima é alcançada no mês de Setembro, cerca de 4,3 m/s, enquanto que a velocidade mínima é obtida no mês de Junho cerca de 2,7 m/s para os anos 2000 e 2001 respectivamente.

Por outro lado, observa-se que as velocidades médias mensais maiores são alcançadas no período entre Setembro a Dezembro com média por volta de 4 m/s. enquanto que velocidades menores são frequentes no período entre os meses de Março a Agosto, onde temos velocidades médias menores que 3,5 m/s, durante todo o período em estudo. A velocidade decresce de Janeiro a Junho (1º semestre) enquanto que a ela cresce de Julho a Dezembro (2º semestre)

De um modo geral, nota-se que as maiores velocidades são registadas durante o período mais quente do ano concretamente entre Setembro a Fevereiro (Verão) enquanto que as menores velocidades se registam nos meses menos quentes, Março a Agosto (Inverno). Resultados que estão de acordo com o regime dos ventos no Hemisfério Sul segundo Cunha (1972), segundo o qual, os ventos são mais intensos no Verão. Isto devido a maior diferença de temperatura entre o equador e os pólos.



**Figura 17.** Variação Mensal da velocidade do vento na Ilha de Inhaca nos anos de 2000 e 2001.

Trabalhos feitos por Lima et al. (1999) mostraram que ao avaliarem a velocidade máxima nos aeroportos de Guarulhos, Campinas, José Campos e Congonhas, todos no Brasil, observaram que as velocidades máximas ocorreram no período mais quente do ano.

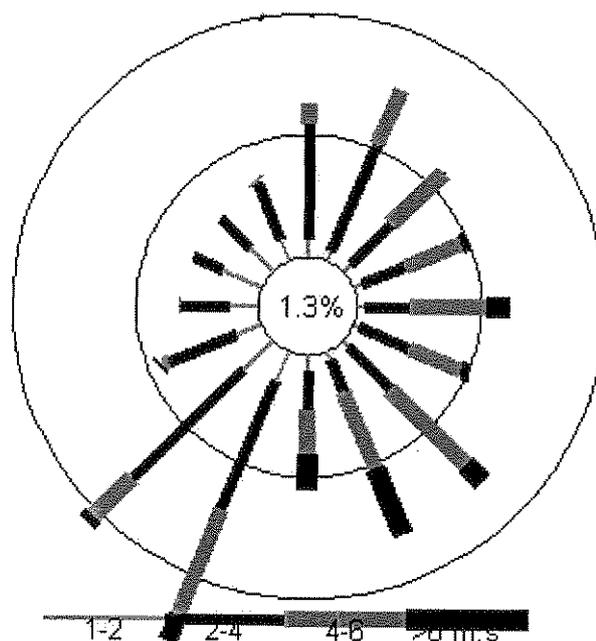
Sendo a velocidade média anual do vento de  $3,58 \pm 0,5$  m/s, na Ilha da Inhaca, torna-se viável a implantação de sistemas eólicos isolados pequenos incluindo os de bombeamento de água, pois ultrapassa 3 m/s, valor recomendado por Sousa (1993), citado por (Silva et al., 2000).

#### **4.1.3 Variação horária da direcção do vento**

Nas secções anteriores foram feitas análise escalar da velocidade do vento enquanto que nesta secção, se apresenta uma análise vectorial (velocidade e direcção) do vento. Para tal, foram construídas rosa-dos-ventos nas quais se apresentam velocidades e direcções do vento num mesmo esquema.

A figura 18 apresenta rosa-dos-ventos construída com base em velocidade e direcção de vento, extraídas no intervalo entre 6 às 17 horas do período em estudo, intervalo em que a velocidade cresce e atinge o máximo valor diário.

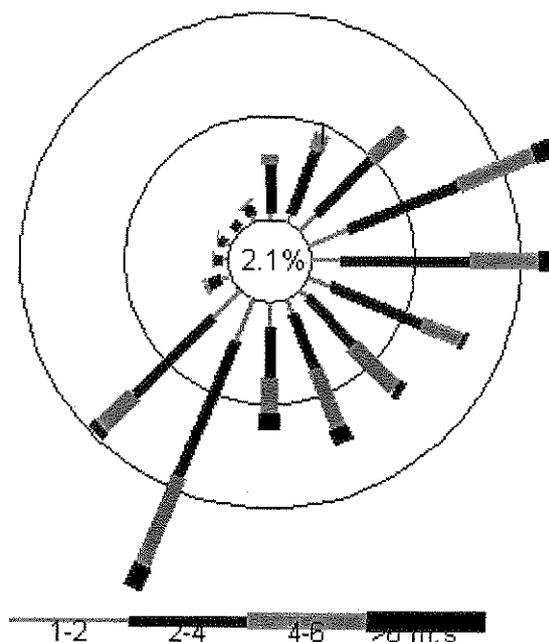
Durante este intervalo, constatou-se que predominaram ventos do quadrante Sul. Também se pode observar que a classe de vento entre 4 e 6 m/s, ocorreram com maior frequência. Com tudo, sendo este intervalo que se registam maiores valores de velocidades, o período de calma (velocidade < 1 m/s) registado foi de 1,3 %.



**Figure 18.** Rosa dos ventos no intervalo entre 06 as 17 horas, durante o período do estudo.

Na figura 19, está apresentado rosa dos ventos no intervalo entre 18 às 5 horas, correspondente ao período em que a velocidade do vento apresenta menores magnitudes durante a análise. Neste período, os ventos predominantes foram de Sudoeste e Leste.

É de notar que durante este intervalo de tempo, as velocidades entre 2 a 4 m/s foram as que ocorreram com maior frequência. Nota-se também que os ventos de noroeste ocorreram com menor frequência. Finalmente importa referir que neste intervalo de tempo foi registado um período de calma de 2.1 %.

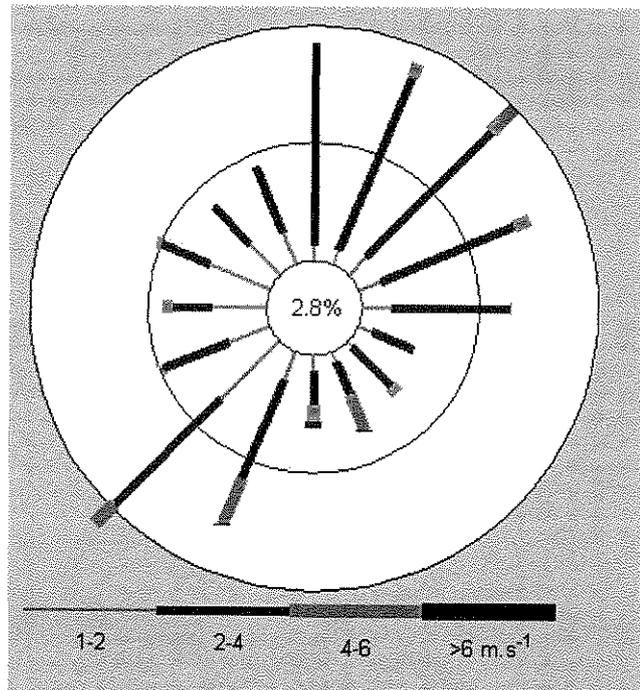


**Figure 19.** Rosa dos ventos no intervalo entre 18 as 05 horas durante o período do estudo.

#### 4.1.4 Variação sazonal da direcção do vento

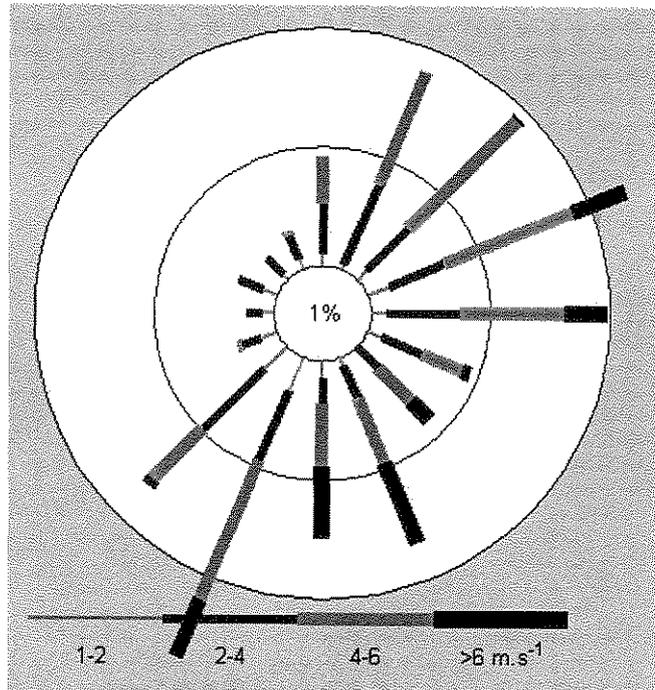
Para a análise da variação sazonal do vento, primeiro foram consideradas as rosa dos ventos correspondentes ao mês Junho, representando o mês de mínimas velocidades e do mês de Setembro, para representar os meses de máximas velocidades. Finalmente analisou-se a direcção predominante associada a estes períodos. As rosas dos ventos para os meses subsequentes estão apresentados no anexo 2.

A figura 20 apresenta a rosa-dos-ventos para o mês de Junho, onde se observa que houve predominância de ventos de Nordeste e Sudoeste. As velocidades entre 2- 4 m/s ocorreram com uma maior frequência. Neste mês, velocidades menores que 1 m/s representaram 2,8 %. Finalmente se observa que os ventos de Sudeste ocorreram com menor frequência.



**Figura 20.** Rosa dos ventos do mês de Junho.

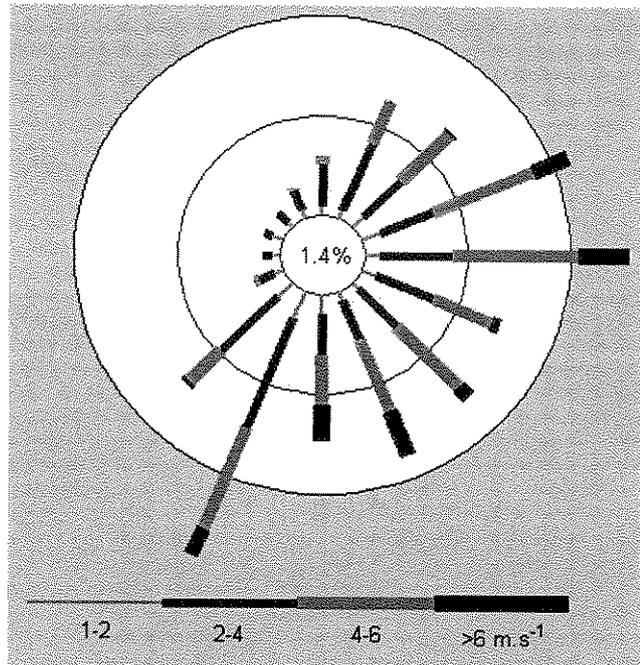
No mês de Setembro a direcção predominante foi de quadrante Sudoeste e Nordeste, figura 21. Durante este período observou-se uma maior ocorrência de velocidades entre 4-6 m/s. Visto anteriormente que este mês se caracterizou por velocidades maiores, os ventos com magnitudes menores que 1 m/s, representaram apenas 1 %. Neste mês, os ventos de Leste e Noroeste ocorreram com menor frequência.



**Figura 21.** Rosa dos ventos do mês de Setembro.

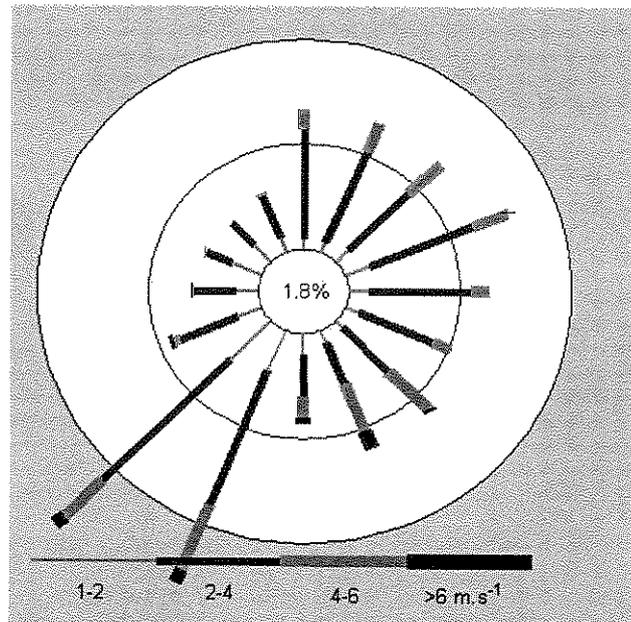
Nas análises feitas em secções anteriores, verificou-se que as velocidades do vento são mais intensas no Verão do que no Inverno. Para analisar a direcção predominante associadas a estas épocas, foram construídas as respectivas rosas dos ventos.

No Verão, figura 22, os ventos predominantes foram do quadrante Sudoeste e Leste. A classe de velocidade entre 4-6 m/s ocorre com maior frequência. Finalmente observa-se que ventos de Noroeste e Oeste foram menos frequentes.



**Figura 22.** Rosa dos ventos durante o Verão no período estudado.

Durante o Inverno figura 23, pode se observar que nesta época predominaram ventos de Sudoeste. Neste período, ocorreram com maior frequência as velocidades entre 2-4 m/s. Visto se tratar da época em que ocorrem menores velocidade, o período de calma representaram 1,8 %. Os ventos de Noroeste voltam a apresentar-se em menor frequência.



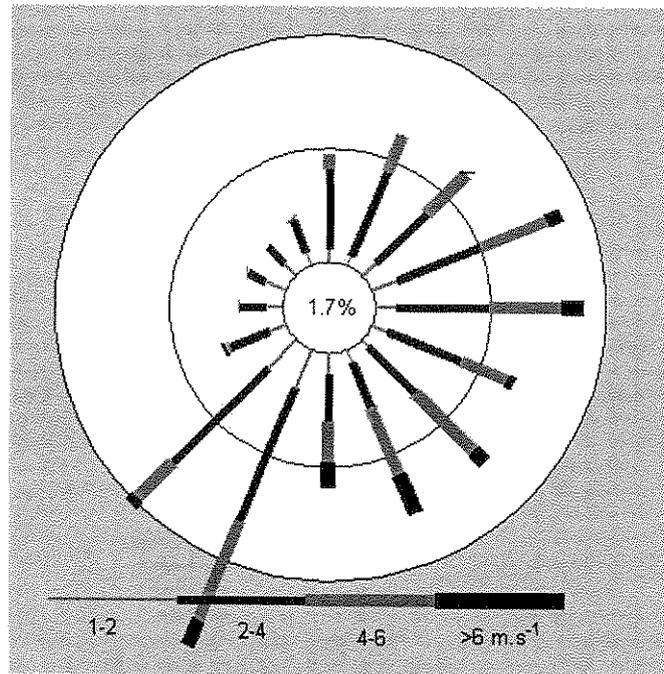
**Figura 23.** Rosa dos ventos durante o Inverno no período estudado.

A direcção predominante do vento ao longo do ano é um dado imprescindível à instalação de turbinas eólicas de grande porte (Silva et al., 2002). O conhecimento da direcção predominante do vento permite utilizar melhor o potencial eólico de uma região, em face as variações de direcção.

Para finalizar a análise da direcção predominante do vento, a figura 24, mostra a rosa dos ventos para todo período estudado, tendo se constatado que os ventos sopraram predominantemente do Sudoeste. Durante este período, as velocidades entre 2-6 m/s ocorreram com maior frequência.

Nota-se que as velocidades mais altas ( $> 6$  m/s) em todo período estiveram associadas aos quadrantes Sudoeste e Leste. Isto, pode estar associado aos alísios do Sudoeste. Por outro lado se observa que os períodos de calma foram menos frequentes, visto que durante todo período estudado, as velocidades menores que 1 m/s representaram apenas 1,7 %.

Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Kalke (1995) segundo o qual, a Ilha de Inhaca está sujeita a fortes ventos oceânicos, e que tem um grande efeito na margem leste e dunas do Leste que nas margens protegidas do Norte e Oeste. Na costa Oeste, os ventos sopram suavemente do Sudoeste e do Nordeste.



**Figura 24.** Rosa dos ventos da Ilha de Inhaca durante o período estudado.

#### 4.2 Avaliação do potencial eólico disponível na Ilha de Inhaca

Energia eólica é a energia cinética do ar em movimento (vento), que pode ser aproveitada pelo homem para realizar trabalho útil.

A identificação do potencial eólico de uma região é tarefa fundamental, e tem como requisito básico e indispensável, a existência de série temporal de velocidades do vento a uma altura adequada. Os valores de velocidade do vento na Ilha de Inhaca foram registados a uma altura de 6 metros.

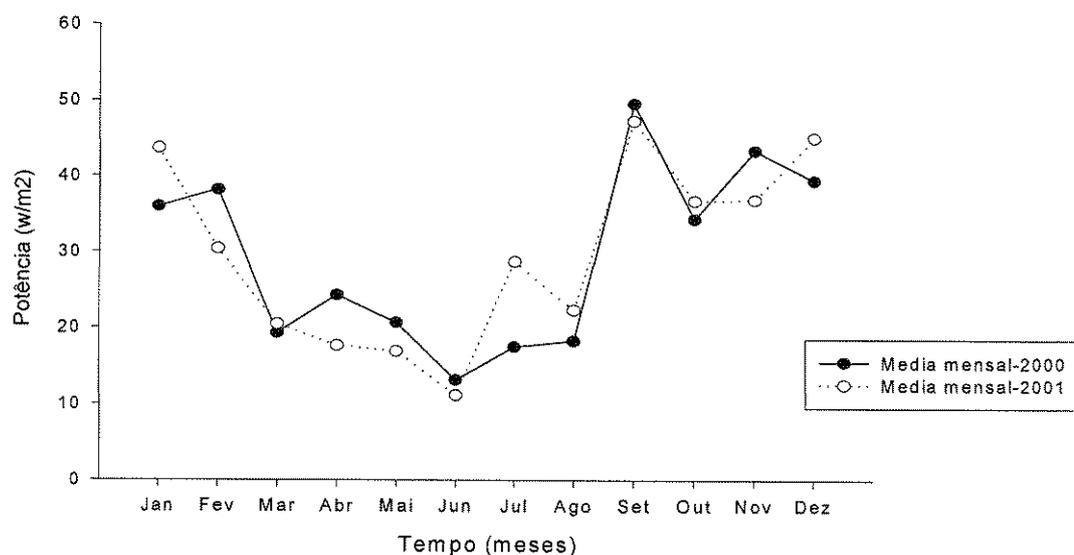
Nesta secção é analisado o potencial eólico em termos de energia específica do vento expressa em Watt por metro quadrado de área varrida pela hélice (densidade de potencia).

Com base nos resultados obtidos na análise do vento determinou-se a potência eólica disponível por unidade de área e suas respectivas médias mensais, sazonais e anuais.

A figura 25, mostra a curva da potência eólica disponível por unidade de área para Ilha da Inhaca, onde se observa que o potencial eólico apresenta variações ao longo do ano.

Os maiores valores de potencial eólico ocorrem de Setembro a Fevereiro (Verão) com médias de  $40,09 \text{ w/m}^2$  enquanto que os menores valores ocorrem de Março a Agosto (Inverno), com média de  $19,20 \text{ w/m}^2$ .

Estas variações devem-se ao facto da potência variar com o cubo da velocidade do vento. Logo, pequenas variações de velocidade resultam em grandes variações da potência obtida (Patel, 1999).



**Figura 25.** Variação mensal da potência eólica disponível por unidade de área.

Por outro lado, valores máximos de potência, cerca de  $48,44 \text{ W/m}^2$  foram registados no mês de Setembro enquanto que os valores mínimos  $12,15 \text{ W/m}^2$ , se obtêm no mês de Junho.

### 4.3 Potência teórica extraída do vento

A potência extraída do vento é expresso como função das velocidades a montante e jusante de uma máquina eólica. Nem toda a potência disponível no vento é extraída, porém apenas uma fracção desse potencial poderá ser realmente convertido em trabalho útil por uma máquina eólica.

A determinação do potencial eólico fornece informações necessárias ao planeamento dessa fonte natural de energia de uma forma racional. Deve-se saber quanta energia está disponível e até que ponto pode ser convertida em energia mecânica ou eléctrica.

Na tabela 2, estão apresentados os valores médios de velocidade ( $V$ ), potencia disponível ( $P$ ) e a potencia extraída ( $P_0$ ). Pode-se verificar que uma velocidade média de 3,58 m/s, corresponde a uma potência média de 29,65 w/m<sup>2</sup>, do qual simplesmente 12,96 w/m<sup>2</sup> poderá ser convertida em trabalho útil.

Para melhorar o ganho de potência em máquinas eólicas, geralmente se eleva a altura de captação com vista a diminuir o atrito da superfície.

Nesta tabela foi feita uma simulação para ilustrar o ganho de potência ao se elevar a altura anemométrica (6 m), para uma torre de 20 m. Na prática, as máquinas eólicas se instalam a altura de 5 a 50 metros ( Twidel e Weir,1986).

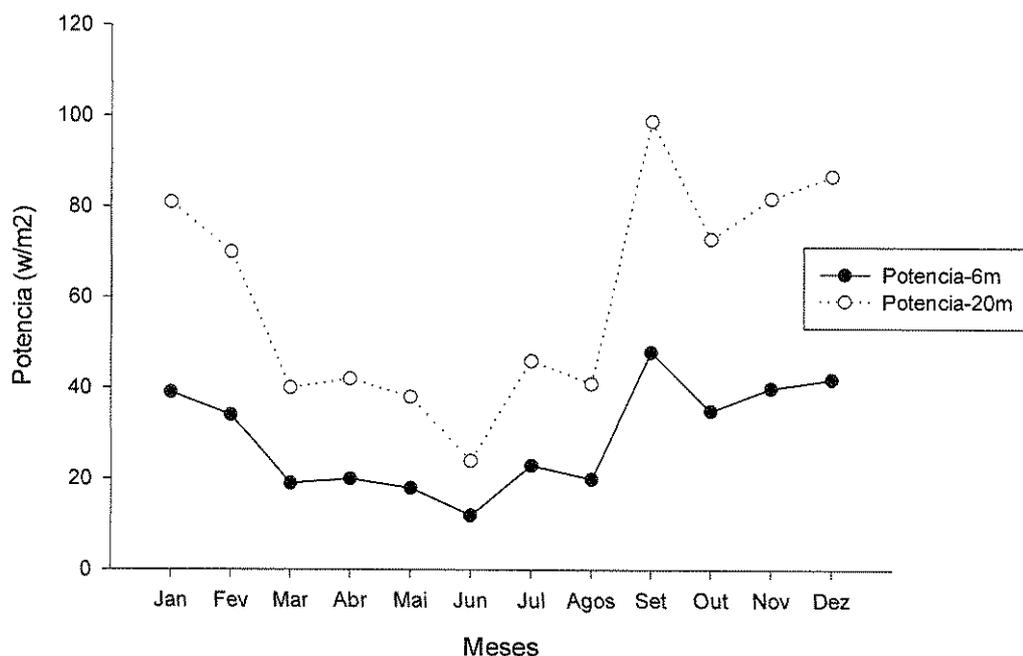
Ao extrapolar os dados colectados, verificou-se que a velocidade média de 3,58 m/s, a altura de 6 m, aumentou para 4,55 m/s, a 20 metros. Com a velocidade de 4,55 m/s pode resultar resulta num potencial disponível de 60,88 w/m<sup>2</sup>. Onde 24,35 w/m<sup>2</sup> poderá ser transformado em trabalho útil por uma máquina eólica.

Este aumento de potência de 28,65 w/m<sup>2</sup> a 6 m para 60.88 w/m<sup>2</sup> a 20 m, representa um ganho de potência em cerca de 100%.

**Tabela 2:** Médias mensais de velocidade do vento, potência eólica disponível (P), Potência teórica extraída (Po) para altura do anemómetro (6m) e extrapoladas para uma torre de 20 m.

Meses	V(m/s)- 6m	P(w/m <sup>2</sup> )- 6m	Pe(w/m <sup>2</sup> )- 6m	V(m/s)- 20m	P(w/m <sup>2</sup> )- 20m	Po(w/m <sup>2</sup> )- 20m
Janeiro	4.02	39.82	15.92	5.11	81.73	32.69
Fevereiro	3.82	34.29	13.66	4.86	70.31	28.12
Marco	3.19	19.9	7.95	4.06	40.99	16.4
Abril	3.24	20.97	8.33	4.12	42.83	17.13
Mai	3.13	18.78	7.51	3.98	38.61	15.45
Junho	2.7	12.15	4.82	3.44	24.93	9.97
Julho	3.33	23.1	9.05	4.24	46.69	18.68
Agosto	3.21	20.31	8.1	4.08	41.6	16.64
Setembro	4.29	48.44	19.34	5.46	99.7	39.88
Outubro	3.87	35.56	14.2	4.93	73.39	29.36
Novembro	4.03	40.16	16.04	5.13	82.69	33.08
Dezembro	4.1	42.27	16.89	5.22	87.12	34.85
<b>Media</b>	<b>3.58</b>	<b>29.65</b>	<b>11.82</b>	<b>4.55</b>	<b>60.88</b>	<b>24.35</b>

Para melhor visualizar os resultados da tabela 3, foi construído o gráfico que é apresentando na figura 26. Ao se extrapolar os dados do vento colectados na altura de 6 metros para uma torre 20 metros. A potência extraída a 6 metros de altura variou de 12.15 a 48.44 w/m<sup>2</sup> enquanto que para a altura de 20 m, variou de 24.93 a 99.70 w/m<sup>2</sup>. Deste gráfico, pode-se concluir que quanto maior for a altura de captação, maior será a potência disponível. Esta é razão pela qual, grande parte de turbinas se instala em alturas elevadas.



**Figura 26.** Variação da potência disponível dos 6 para 20 metros de altura.

#### 4.4 Comparação do potencial eólico entre a Ilha de Inhaca e Maputo

Nesta secção é feita uma análise comparativa do potencial entre Inhaca e Maputo (estação observatório do INAM).

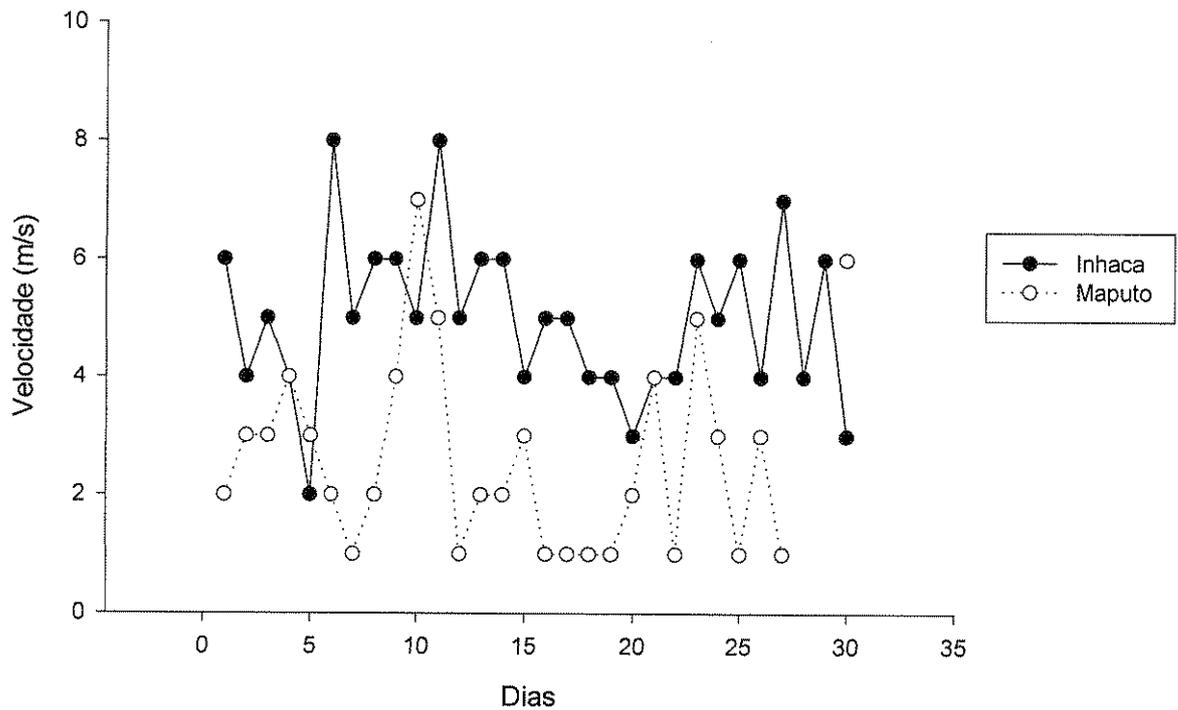
Para esta análise, foram seleccionadas velocidades do vento do mês de Setembro as 15 horas, para melhor representar o período de máximas velocidades. Isto porque nas estações sinópticas, os dados de velocidade do vento são colectados as 09, 15 e 21 horas. Para este estudo foram seleccionados os dados de velocidade das 15 horas do mês de Setembro de 2001 de ambas estações.

##### 4.4.1 Distribuição da velocidade

Na figura 27 esta mostrada a variação da velocidade para Inhaca e Maputo. Na Inhaca, a variação da velocidade do vento esta compreendida entre 2,84 a 8,53 m/s. Durante este período, a velocidade media foi de 5,55 m/s e um desvio padrão de 1,42 (anexo 3). Enquanto que para

Maputo, a velocidade variou de 1,11 a 7,78 m/s e velocidade média foi de 3,13 m/s e um desvio padrão de 1,68.

Estes resultados demonstram que a região de Inhaca se apresenta com maiores valores de velocidade e pequena variabilidade nos dados, enquanto que no Maputo apesar dos menores valores de velocidades, os dados apresentam maior variabilidade (anexo 3).

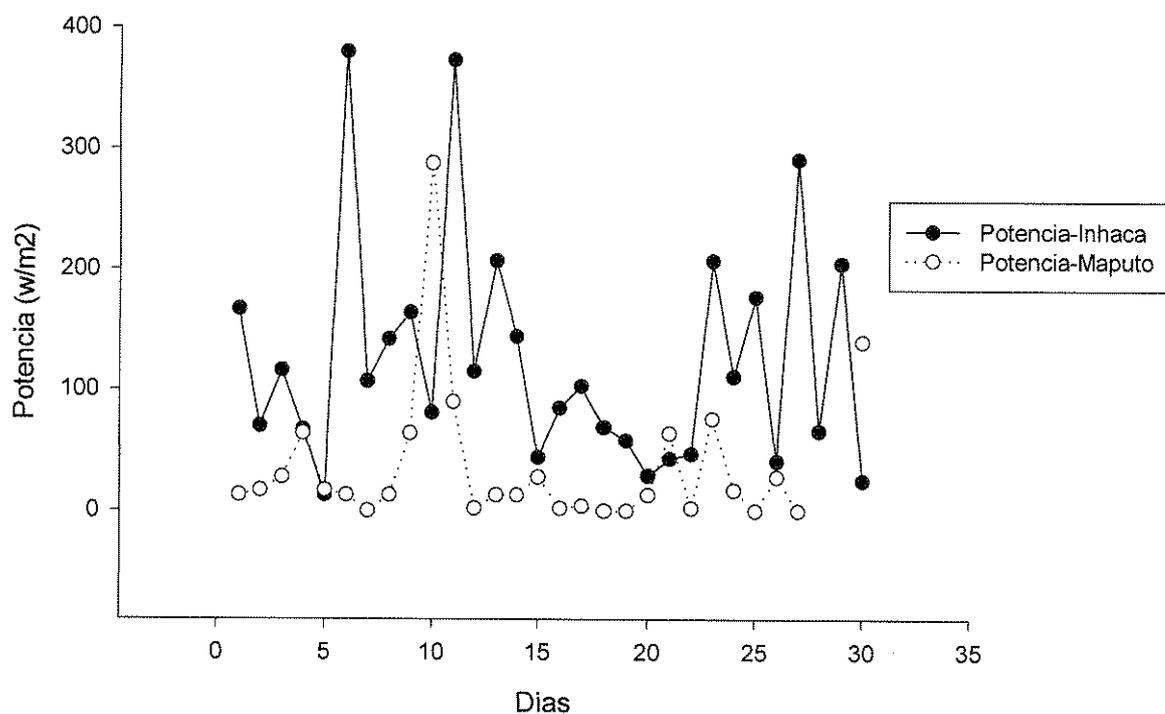


**Figura 27.** Comparação de velocidades do vento entre Inhaca e Maputo no mês de Setembro de 2000.

#### 4.4.2 Distribuição da potência

Dois lugares com potencial eólico são comparados em termos de energia específica em Watt por metro quadrado de área varrida pela hélice em movimento. A isto também se refere de densidade de potência de um local (Twidel e Weir, 1986).

A potencia eólica disponível neste período para as duas estações esta apresentado na figura 28. Onde se observa que a Ilha de Inhaca apresenta um potencial médio de  $125,44 \text{ w/m}^2$ . Os valores variaram entre  $13,96$  a  $380,15 \text{ w/m}^2$ , enquanto que os valores de Maputo variaram de  $0,84$  a  $288,88 \text{ w/m}^2$ , com uma média de  $36,65 \text{ w/m}^2$ . Ambos lugares apresentam grandes variações de potência.



**Figura 28.** Potência eólica disponível as 15 horas do mês de Setembro de 2000 para Ilha de Inhaca e Maputo.

Esta variabilidade deve-se ao facto de terem sido extraídas apenas registos de uma determinada hora do dia. Para que os resultados apresentem uma melhor precisão. Seriam necessários uma série de dados contínuos de cerca de um ano. Logo dados sinópticos de curto termo não são adequados para a avaliação precisa do potencial eólico de um local.

A Ilha de Inhaca apresentou maior potencial eólico em quase todo período. Este facto pode se aliar ao facto da Ilha estar sujeita a grandes ventos oceânicos devido ao menor atrito das águas, enquanto estação de Maputo, por se encontrar em zona urbana, o efeito de atrito é mais acentuada, o que reduz a velocidade do vento. A instalação de sistemas eólicos na região de Maputo sugeria uma grande elevação da altura.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1 Conclusões

No contexto da crescente pressão para o desenvolvimento da exploração das energias renováveis, a energia eólica é tida como a alternativa mais viável para a produção de energia eléctrica e mecânica para o bombeamento de água.

De acordo com os objectivos propostos para a realização deste trabalho, foram feitas análises da velocidade e direcção do vento que nos permitem chegar as seguintes conclusões:

- A velocidade média na Ilha de Inhaca a 6 metros de altura é de  $3,58 \pm 0,5$  m/s. Portanto, este valor é teoricamente viável para o uso de sistemas eólicos, visto que ultrapassa o valor de 3 m/s.
- A velocidade do vento é mais intensa no Verão do que no Inverno. Sendo o valor máximo observado no mês de Setembro, de 4,29 m/s, e o mínimo em Junho, 2,7 m/s;
- A direcção predominante do vento na Ilha de Inhaca é de Sudoeste;
- Os ventos de maior magnitude registados na Ilha de Inhaca, sopram do sudeste e leste;
- O potencial disponível na Ilha de Inhaca é de  $29,65 \pm 12$  w/m<sup>2</sup>. Este resultado torna viável para o uso deste recurso no bombeamento de água, irrigação e geração de electricidade por sistemas eólicos de pequena dimensão. Por superar o valor de 15 w/m<sup>2</sup>.
- A Ilha de Inhaca apresenta maior potencial eólico em relação a Maputo. Contudo estes resultados apenas representaram uma faixa de velocidade, por falta de dados horários de velocidade do vento na estação observatório do INAM.

## 5.2 Recomendações

Face as constatações durante a realização deste trabalho e para melhorias de trabalhos posteriores, recomenda-se:

- Fazer o maneamento eólico das zonas rurais do País carentes em energia, e com aglomerado populacional, indicando regiões de maior potencial eólico com vista a facilitar o estudo do aproveitamento eólico no bombeamento de água para irrigação de terrenos agrícolas;
- Aprofundar o estudo do rendimento esperado de uma máquina em função do potencial encontrado no local;
- Para maior precisão dos resultados, recomenda-se que a colecta de dados seja feita de uma forma contínua e com um intervalo de tempo mínimo entre as medições;
- O Departamento de Física deve adquirir uma estação móvel com vista a facilitar estudos mais aprofundados em diferentes regiões do País com vista a despertar atenção neste tipo de aproveitamento;

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cerescer, M. et al. (2003). Análise do Potencial Eólico do Município de Aceguá. World Climate and Energy Event, Rio de Janeiro- Brazil.
2. Cunha, R. (1972). Meteorologia Geral Agrícola.
3. Ferreira, H.A. (1965). Climatologia Dinâmica da Africa Meridional. Compêndio Para Formação do Pessoal Meteorológico da Classe IV, vol II; Lisboa.
4. Frulling, I., C. E. L. Oliveira e M. A. U. Opaso (2003). Análise Climatológica do Potencial Eólico na Região de Cascavel-PR.
5. Galdino, M. A., P. C. Silva (2004). Perguntas Mais Frequentes Sobre Energia Eólica, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRECESB, Brazil.
6. Holton, D. R. (1997). Dinamic Meteorology.
7. Houghton, D. D. (1985). Handbook of Aplied Meteorology. Universit of Wiscosin. School of Gographysical Science, Geographical Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
8. Kalke, M. (1995). A Natural History of Inhaca Island, third edition.
9. Kristy, R. (2004). Wind Rose Plot, Climatology Research Group, University of the Witwatersrant. Não publicado.
10. Lonry, W. (1972). Climatologia. Vol II do manual de formação de pessoal meteorológico classe IV.
11. Lima, M. L., S. R. M. Ferreira, V. M. C. Oliveira (1999). Comparação dos Elementos Climáticos observados nas estações de Guarulhos, Congonhas (SP), Viracopos (canpinas) e São José de Campos. Trabalho do final do curso, Colégio Técnico – UNIVAP.
12. Mota, L. A. (1964). Análise de condições climáticas de Moçambique. Vol 33.
13. Patel, M. R. (1999). Wind and solar Power Sistems. U.S. Merchant Marine Academy King Point, New York.

14. Retallack, B. J. (1970) Meteorologia. Compêndio para a formação do pessoal meteorológico da classe IV, vol II, Lisboa.
15. Silva, et al. (2002). Potencial Eólico na Direção Predominante do Vento no Noroeste Brasileiro. Revista de Engenharia agrícola e ambiental. Vol 6, Campina Grande, Brazil.
16. Silva, C. D, O. J. Seraphim e N. M. Teixeira (2000). Potencial Eólico para Bombeamento de Água na Fazenda Legeado. Departamento de Engenharia Rural de Faculdade de ciências agronômicas/UNESP, Batucatu- Brazil
17. Twidel, J. W. e D. W. Antony (1986). Renewable Energy Resources. University Press, Cambridge
18. Wilks, D. S. (1995). Statistical Methods in the Atmospheric sciences.
19. [www.windpower.org](http://www.windpower.org). (2003). Asociacion Denesa de la Industria Eólica.
20. [www.Hakaram.freeyellow.com.br](http://www.Hakaram.freeyellow.com.br). (2001). Consultoria Ambiental Sobre Energia Eólica.
21. Vaisala (1985). Meteorological Instrument Catalog 185, Instrumentation for Surface Weather Observation. Gafine Monex oy, Helsink.

## **7. ANEXOS**

**Anexo 1: Velocidades médias horárias e diárias da Ilha de Inhaca de Janeiro de 2000 a Dezembro de 2001.****Tabela 1: Médias horárias de velocidade do vento em m/s do ano 2000, na Ilha de Inhaca.**

Horas/Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média
1	3.10	3.37	2.47	2.92	3.19	2.62	2.65	2.55	3.73	3.45	3.76	3.61	3.12
2	3.00	3.29	2.60	2.93	3.30	2.66	2.66	2.27	3.59	3.15	3.49	3.14	3.01
3	2.93	3.27	2.62	3.01	3.15	2.71	2.76	2.32	3.55	3.01	3.39	2.83	2.96
4	2.94	3.10	2.56	3.17	3.21	2.69	2.86	2.41	3.53	2.96	3.26	2.69	2.95
5	3.04	3.32	2.57	3.28	3.32	2.59	2.87	2.51	3.74	3.05	3.23	2.62	3.01
6	3.11	3.25	2.62	3.31	3.32	2.61	2.82	2.44	3.76	2.91	3.18	2.69	3.00
7	3.01	3.34	2.66	3.23	3.22	2.50	2.96	2.50	3.71	2.85	3.35	2.96	3.02
8	3.27	3.67	2.63	3.37	3.37	2.60	3.06	2.50	3.77	3.20	3.64	3.17	3.19
9	3.51	3.77	3.00	3.44	3.51	2.73	3.16	2.70	3.74	3.32	3.73	3.35	3.33
10	3.55	3.84	3.02	3.46	3.33	2.77	3.09	2.85	4.08	3.37	3.70	3.52	3.38
11	3.70	3.99	2.97	3.40	3.28	2.78	3.01	3.05	4.25	3.59	3.80	3.61	3.45
12	4.15	4.09	2.95	3.53	3.19	2.79	2.95	2.93	4.49	3.91	3.98	3.96	3.58
13	4.15	4.20	3.26	3.78	3.17	2.93	3.15	3.18	4.78	4.36	4.43	4.44	3.82
14	4.40	4.48	3.67	3.78	3.39	3.04	3.19	3.52	5.09	4.78	4.61	4.84	4.07
15	5.07	4.83	3.82	4.17	3.54	3.16	3.39	4.10	5.39	5.06	5.11	5.28	4.41
16	5.40	4.94	4.16	4.26	3.58	3.24	3.72	4.43	5.59	5.11	5.45	5.48	4.61
17	5.35	4.84	4.21	4.07	3.32	3.09	3.54	4.45	5.41	5.13	5.46	5.67	4.54
18	5.17	4.68	3.99	3.67	3.08	2.90	3.13	3.87	5.10	4.81	5.32	5.60	4.28
19	4.78	4.57	3.95	3.43	3.07	2.85	3.27	3.73	4.78	4.48	5.03	5.27	4.10
20	4.32	4.56	3.84	3.41	2.98	2.84	3.35	3.64	4.70	4.26	4.69	4.78	3.95
21	4.09	4.35	3.67	3.26	3.00	2.82	3.28	3.50	4.57	4.18	4.39	4.44	3.80
22	3.99	4.01	3.24	2.99	2.86	2.68	3.02	3.25	4.30	3.92	4.17	4.39	3.57
23	3.84	3.81	2.78	2.99	2.93	2.57	2.88	2.96	4.16	3.69	3.93	4.08	3.38
24	3.43	3.59	2.58	3.00	3.25	2.55	2.61	2.80	4.00	3.36	4.22	3.82	3.27

Tabela 2: Velocidade média diária em m/s do ano 2000 na Ilha de Inhaca.

Dias	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	2.30	3.03	2.00	3.48	3.13	2.20	2.03	2.42	4.42	4.67	3.21	3.25
2	3.73	3.61	3.26	2.57	3.76	2.99	2.57	2.64	3.30	4.81	4.53	3.94
3	4.92	5.10	2.82	2.14	2.66	2.45	2.34	3.59	4.76	2.94	3.20	4.78
4	4.83	5.52	2.57	4.21	2.87	3.95	2.19	3.57	4.48	4.52	4.10	4.22
5	3.04	3.76	3.36	6.91	3.34	4.66	2.73	3.63	2.56	4.39	3.91	3.01
6	2.98	4.32	2.94	5.72	3.51	3.74	3.70	2.26	2.98	3.43	3.58	4.69
7	2.94	3.66	3.90	4.20	4.56	2.31	2.84	2.27	5.49	2.37	3.47	5.36
8	5.00	1.59	4.94	3.38	3.06	2.10	2.44	2.73	3.73	3.99	4.25	4.26
9	5.55	1.78	4.46	3.33	2.54	1.76	2.70	3.54	4.43	4.46	4.37	3.02
10	3.51	2.23	4.16	4.77	3.21	2.44	2.35	3.13	5.70	5.82	2.90	3.28
11	4.08	2.96	3.70	3.41	2.48	3.13	2.33	2.74	6.06	4.91	4.38	3.71
12	3.43	2.70	2.88	2.96	6.31	2.33	1.85	4.09	4.39	2.51	4.23	6.04
13	7.43	2.53	2.13	3.84	6.17	2.23	3.29	3.26	4.71	4.16	5.24	3.21
14	5.72	2.67	2.52	3.46	4.39	3.14	3.99	4.64	5.07	4.37	5.65	3.80
15	4.34	2.91	2.55	2.43	3.41	2.80	4.51	3.55	4.51	2.26	3.97	3.08
16	4.18	6.40	2.91	3.35	2.21	3.63	4.59	2.64	3.35	3.34	3.29	4.57
17	5.63	5.57	4.60	2.26	2.06	3.15	3.42	2.73	4.81	1.97	3.76	4.79
18	5.61	4.28	2.81	3.45	2.11	3.39	4.52	3.31	5.32	3.41	4.63	3.35
19	3.69	4.28	1.66	3.08	2.10	3.10	4.85	2.65	4.96	4.71	4.01	3.31
20	2.93	3.70	3.22	2.39	2.48	1.93	3.84	3.37	5.13	4.28	5.68	3.45
21	2.93	5.51	4.44	1.77	3.01	3.15	2.75	4.43	4.26	3.30	6.92	4.03
22	3.71	5.88	2.04	2.74	3.48	3.42	2.42	4.11	2.71	3.78	5.47	4.05
23	2.85	5.99	1.81	3.04	2.60	3.80	3.40	1.97	2.52	4.34	3.11	3.78
24	2.89	6.60	2.49	4.18	3.27	2.86	2.46	2.15	3.90	4.30	4.19	3.95
25	3.12	4.69	2.26	2.75	2.51	2.28	3.23	2.27	4.28	2.98	4.48	5.38
26	2.64	3.71	3.64	3.82	3.66	1.79	4.37	2.50	4.07	3.76	3.31	4.64
27	1.87	3.73	4.20	4.33	3.76	2.00	2.99	2.39	3.55	4.34	2.54	3.17
28	3.36	4.50	3.03	3.71	2.33	2.10	2.33	2.36	4.33	3.06	3.18	4.75
29	4.60	1.81	3.53	2.22	3.07	2.19	2.86	3.81	5.04	3.95	3.29	3.63

30	3.21	2.46	2.42	3.03	2.36	2.11	4.04	4.95	4.21	5.32	4.26
31	3.46	4.65	3.09	3.09	2.75	3.35	3.35	3.35	3.35	3.35	3.53
<b>Média</b>	<b>3.89</b>	<b>3.96</b>	<b>3.16</b>	<b>3.41</b>	<b>3.23</b>	<b>2.78</b>	<b>3.06</b>	<b>4.33</b>	<b>3.83</b>	<b>4.14</b>	<b>4.01</b>

Tabela 3: Velocidade média horária em m/s do ano 2001, na Ilha de Inhaca.

Horas/Mês	Janeiro	Fevereiro	Marco	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Média
1	3.39	3.07	2.31	2.60	2.79	2.42	3.32	3.12	3.55	3.23	3.16	3.82	3.07
2	3.17	2.97	2.36	2.55	3.00	2.47	3.30	2.95	3.18	3.11	3.14	3.67	2.99
3	3.03	2.88	2.34	2.64	2.92	2.53	3.25	3.00	2.91	3.08	2.98	3.46	2.92
4	2.92	2.91	2.46	2.81	3.02	2.59	3.41	2.84	3.07	3.05	2.91	3.35	2.94
5	2.96	3.00	2.63	2.88	3.04	2.50	3.38	2.74	3.24	2.98	3.00	3.26	2.97
6	3.04	3.03	2.76	2.76	3.00	2.54	3.27	2.66	3.16	2.84	2.74	3.38	2.93
7	3.16	3.05	2.84	2.87	3.02	2.54	3.30	2.73	3.19	3.01	2.97	3.40	3.01
8	3.42	3.19	2.98	2.99	2.98	2.50	3.36	2.87	3.22	3.21	3.46	3.56	3.15
9	3.58	3.23	3.05	3.07	3.09	2.52	3.45	2.97	3.53	3.48	3.67	3.50	3.26
10	3.54	3.36	3.03	3.13	3.08	2.48	3.49	3.08	3.65	3.64	3.86	3.90	3.36
11	3.69	3.52	2.96	3.06	2.95	2.67	3.50	3.26	3.78	4.02	4.04	4.14	3.46
12	3.78	3.63	3.24	3.06	2.95	2.69	3.49	3.25	4.20	4.39	4.03	4.35	3.59
13	4.20	3.93	3.49	3.28	2.94	2.64	3.47	3.46	4.54	4.65	4.44	4.72	3.81
14	4.93	4.35	3.67	3.45	3.20	2.72	3.64	3.95	5.06	5.03	4.84	4.91	4.15
15	5.39	4.79	4.07	3.61	3.13	2.93	4.18	4.12	5.56	5.47	5.18	5.18	4.47
16	5.75	4.98	4.44	3.80	3.37	3.06	4.20	4.30	5.92	5.85	5.37	5.32	4.70
17	5.88	5.04	4.50	3.69	3.31	2.85	4.08	4.20	6.09	6.02	5.37	5.43	4.70
18	5.79	4.79	4.10	3.26	2.96	2.57	3.92	3.90	5.70	5.59	4.92	5.41	4.41

19	5.37	4.28	3.87	3.21	3.04	2.75	3.88	3.75	5.46	5.43	4.55	4.97	4.21
20	5.19	3.87	3.73	3.35	3.01	2.69	3.79	3.62	5.35	5.17	4.31	4.56	4.05
21	4.84	3.82	3.62	3.15	3.02	2.67	3.69	3.32	5.07	4.76	4.05	4.43	3.87
22	4.57	3.74	3.31	2.95	3.01	2.69	3.84	3.23	4.66	4.35	3.96	4.20	3.71
23	4.16	3.47	3.00	2.74	2.83	2.62	3.77	3.15	4.30	4.04	3.73	3.94	3.48
24	3.82	3.32	2.58	2.66	2.87	2.49	3.56	3.12	3.83	4.01	3.42	3.73	3.28

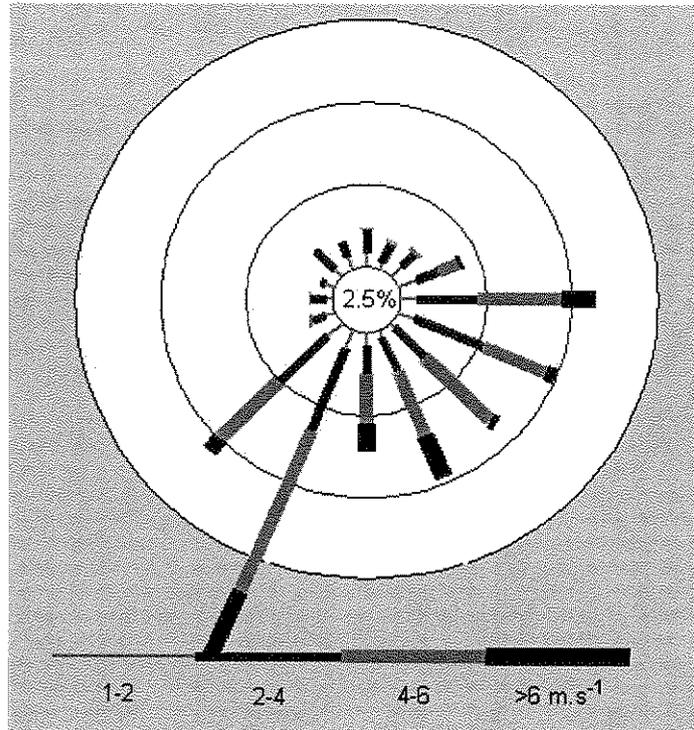
Table 4: Velocidades do vento médias diárias em m/s do ano 2001, na Inhaca.

Dias/Mês	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1	4.01	2.94	3	2.82	2.68	3.41	4.37	2.47	4.95	3.82	3.03	4.08
2	6.35	4.47	2.72	3.47	3.72	1.94	2.79	2.33	3.4	5	2.88	4.18
3	5.13	4.44	2.82	3.98	2.96	3.19	3.48	2.86	5.12	3.14	4.29	5.46
4	5.17	6.32	4.17	5.45	2.41	3.25	3.85	2.32	5.31	4.3	4.48	2.83
5	4.69	4.98	4.28	4.52	3.58	1.52	3.63	2.99	3.3	4.93	5.34	3.81
6	3.96	3.6	2.72	3.86	4.14	1.77	5.19	3.85	5.3	4.89	3.69	4.07
7	4.42	3.02	3.65	2.22	2.53	2.74	3.1	3.11	3.78	4.2	5.33	3.76
8	4.47	3.05	2.82	1.7	2.29	2.47	2.38	2.39	3.9	5.16	3.61	3.87
9	3.46	3.94	4.05	1.9	3.88	2.04	3.7	3.31	5.15	3.45	5.57	5.04
10	5.07	3.48	2.75	1.88	2.39	2.11	3.49	4.41	4.97	3.09	2.8	4.93
11	4.59	3.55	3.6	2.28	2.87	1.98	3.78	5.4	5.52	3.18	3.78	4.84
12	3.07	3.68	4.31	2.45	2.47	2.33	2.29	3.49	4.93	3.54	3.34	3.84
13	3.99	2.88	5.4	2.53	2.59	2.23	2.21	2.88	5.77	5.58	4.29	3.81
14	3.99	3.56	4.03	4.93	2.23	3.12	2.17	3.73	5.92	3.03	3.56	3.32

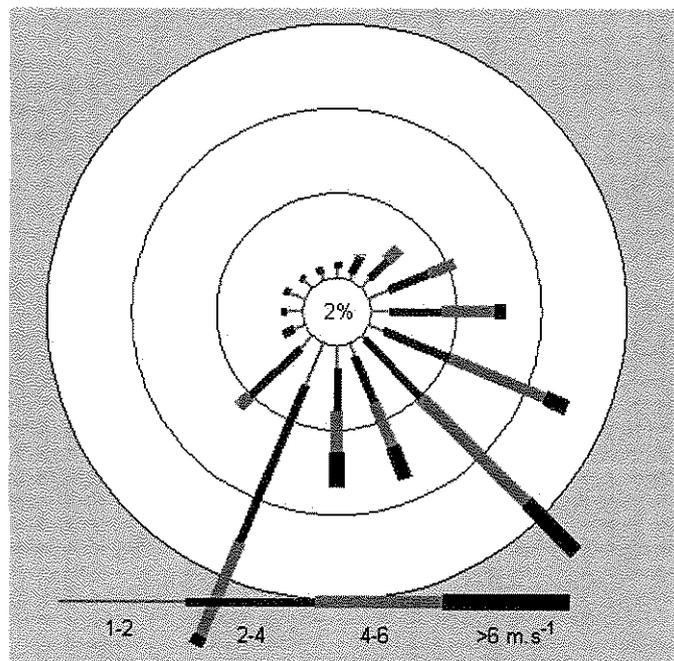
Distribuição Estatística do Potencial Eólico na Ilha de Inhaca

15	4.25	4.69	3.32	3.28	2.39	2.51	2.33	3.87	3.5	5.52	3.58	4.1
16	4.25	2.71	2.42	3.36	2.17	2.17	3.6	2.18	3.51	4.29	3.7	3.19
17	4.78	3.93	2.14	3.46	2.44	2.75	4.11	2.35	4.21	4.76	2.99	4.43
18	4.13	4.15	3.63	2.87	2.54	3.32	4.15	3.23	2.75	4.03	4.25	3.69
19	3.17	3.24	5.14	2.06	3.13	4.56	3.62	2.86	3.65	2.8	4.23	4.01
20	3.28	3.7	2.55	2.01	3.32	3.2	2.82	4.07	2.63	2.55	3.72	5.11
21	3.28	3.77	2.84	2.7	2.44	3.62	3.85	3.21	2.79	2.24	4.44	3.8
22	4.28	3.96	3.13	3.17	3.04	2.05	4.03	4.56	3.05	3.56	4.09	3.21
23	3.35	3.12	1.71	3.71	3.78	3.05	4.47	2.48	4.55	3.68	3.05	5.04
24	3.12	3.94	2.52	4.11	2.68	2.42	6.13	4.33	4.32	2.6	4	5.05
25	5.51	3.05	2.31	3.38	4.09	1.69	4.92	3.79	5.39	2.88	3.83	4.41
26	4.77	2.17	2.97	1.9	3.8	2.11	3.24	2.17	3.27	3.23	3.6	5.29
27	3.91	3.53	3	2.72	5.32	2.66	2.26	3.41	4.93	2.71	4.71	5.18
28	3.4	3.08	3.03	3.63	2.34	2.28	2.35	2.94	5.68	4.34	4.17	5.41
29	3.01		3.39	2.89	3.18	3.51	4.94	4.01	3.67	4.71	2.96	3.32
30	3.39		2.53	2.77	3.6	2.87	4.07	4.4	2.57	5.73	4.28	4.02
31	4.34		2.92		2.69		4.46	3.42		4.46		2.83
<b>Média</b>	<b>4.15</b>	<b>3.68</b>	<b>3.22</b>	<b>3.07</b>	<b>3.02</b>	<b>2.63</b>	<b>3.61</b>	<b>3.32</b>	<b>4.26</b>	<b>3.92</b>	<b>3.92</b>	<b>4.19</b>

**ANEXO 2:** Rosa dos ventos mensais na Ilha de Inhaca para 00/01.



**Figura 1:** Rosa dos ventos do mês de Janeiro



**Figura 2:** Rosa dos ventos do mês de Fevereiro.

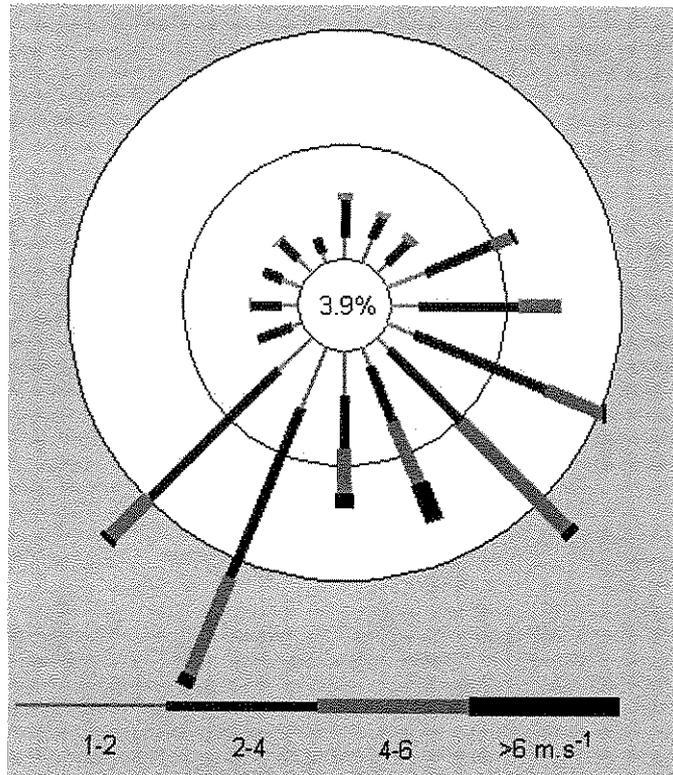


Figura 3: Rosa dos ventos do mês de Março.

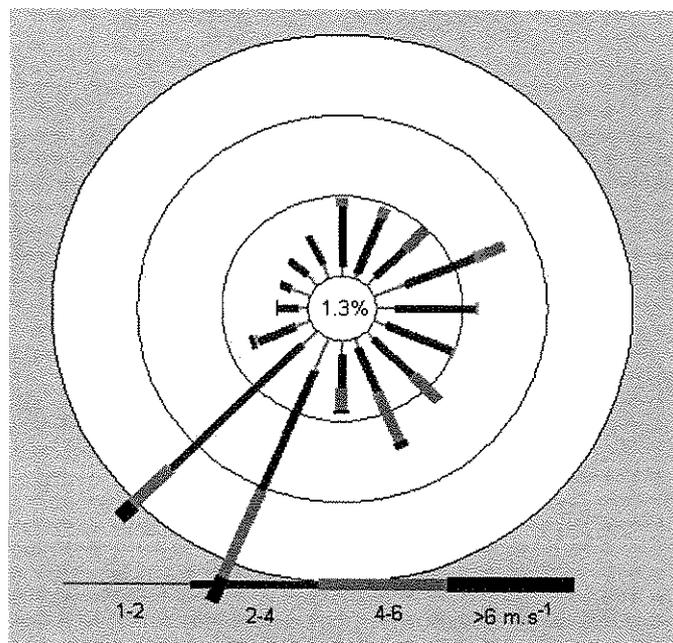


Figura 4: Rosa dos ventos do mês de Abril

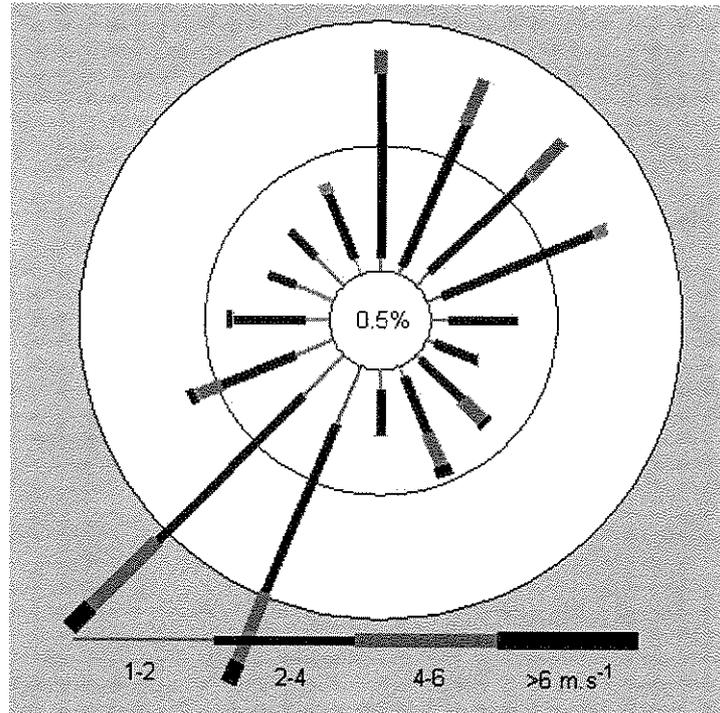


Figura 5: Rosa dos ventos do mês de Maio.

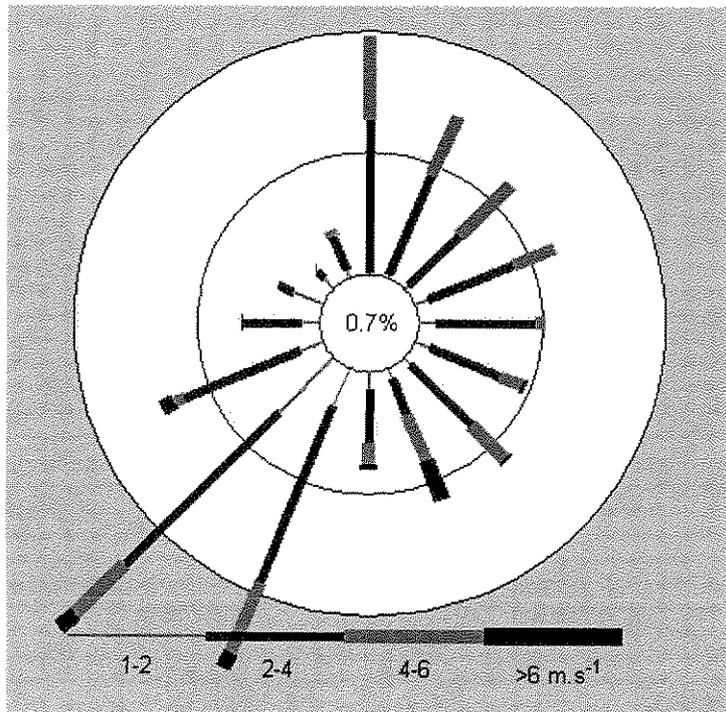


Figura 6: Rosa dos ventos do mês de Julho.

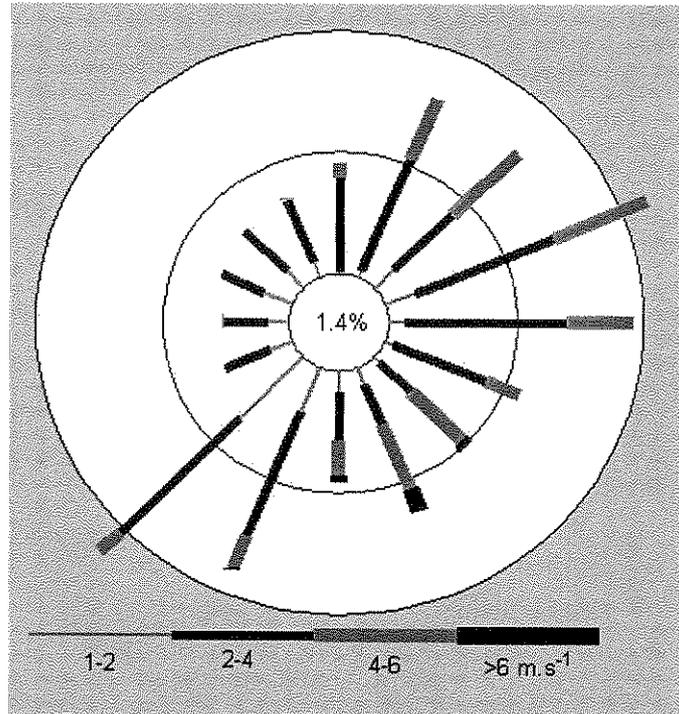


Figure 7: Rora dos ventos do mês de Agosto

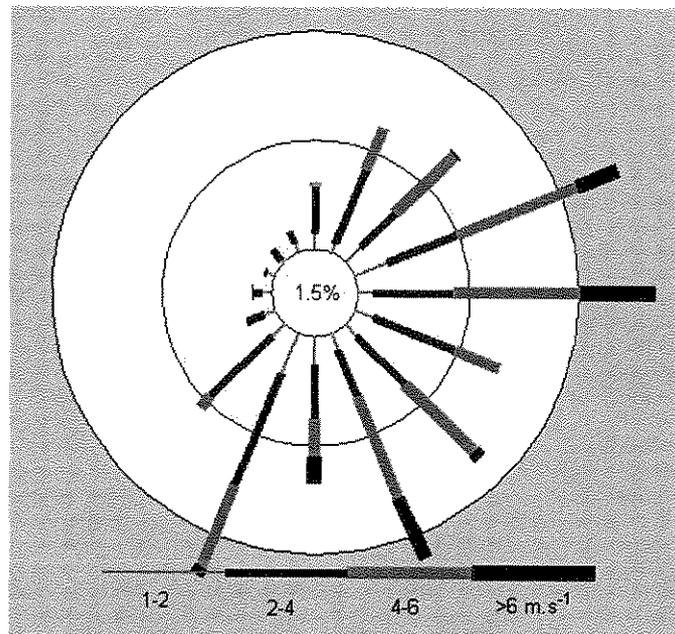


Figura 8: Rosa dos ventos do mês de Outubro

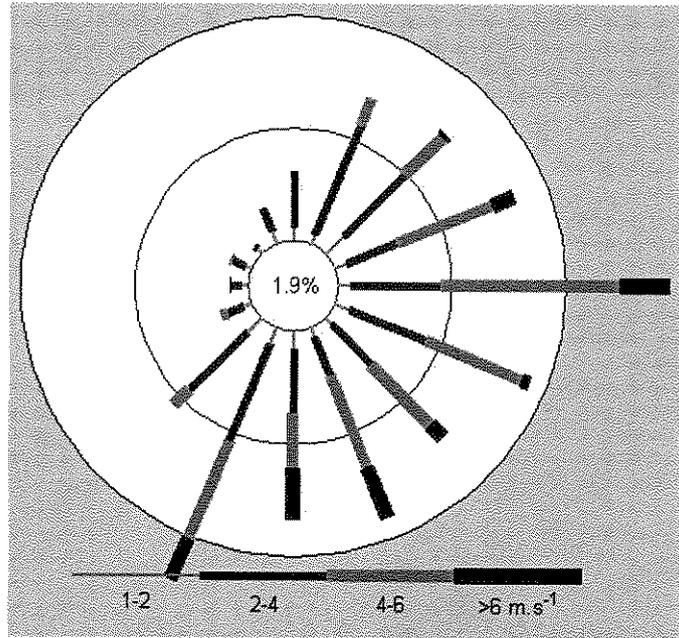


Figura 9: Rosa dos ventos do mês de Novembro.

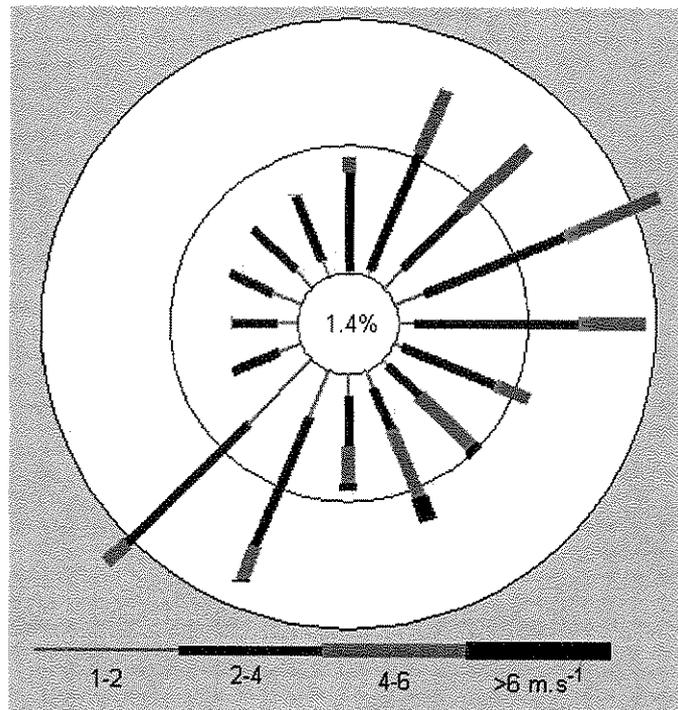


Figure 10: Rosa dos ventos do mês de Dezembro

**ANEXO 3: Análises estatísticas****Tabela 1:** Análises estatísticas feita as médias mensais de velocidade (V) e potência disponível (P) e extraída ( $P_o$ ), na Ilha de Inhaca, durante o período em estudo.

Meses	V(m/s)-	P(w/m <sup>2</sup> )-	Pe(w/m <sup>2</sup> )-	V(m/s)-	P(w/m <sup>2</sup> )-	Po(w/m <sup>2</sup> )-
	6m	6m	6m	20m	20m	20m
<b>Janeiro</b>	4.02	39.82	15.92	5.11	81.73	32.69
<b>Fevereiro</b>	3.82	34.29	13.66	4.86	70.31	28.12
<b>Marco</b>	3.19	19.9	7.95	4.06	40.99	16.4
<b>Abril</b>	3.24	20.97	8.33	4.12	42.83	17.13
<b>Maió</b>	3.13	18.78	7.51	3.98	38.61	15.45
<b>Junho</b>	2.7	12.15	4.82	3.44	24.93	9.97
<b>Julho</b>	3.33	23.1	9.05	4.24	46.69	18.68
<b>Agosto</b>	3.21	20.31	8.1	4.08	41.6	16.64
<b>Setembro</b>	4.29	48.44	19.34	5.46	99.7	39.88
<b>Outubro</b>	3.87	35.56	14.2	4.93	73.39	29.36
<b>Novembro</b>	4.03	40.16	16.04	5.13	82.69	33.08
<b>Dezembro</b>	4.1	42.27	16.89	5.22	87.12	34.85
<b>Media</b>	<b>3.58</b>	<b>29.65</b>	<b>11.82</b>	<b>4.55</b>	<b>60.88</b>	<b>24.35</b>
<b>Mediana</b>	<b>3.58</b>	<b>28.70</b>	<b>11.36</b>	<b>4.55</b>	<b>58.50</b>	<b>23.40</b>
<b>Min</b>	<b>2.70</b>	<b>12.15</b>	<b>4.82</b>	<b>3.44</b>	<b>24.93</b>	<b>9.97</b>
<b>Max</b>	<b>4.29</b>	<b>48.44</b>	<b>19.34</b>	<b>5.46</b>	<b>99.70</b>	<b>39.88</b>
<b>Var</b>	<b>0.25</b>	<b>137.06</b>	<b>22.02</b>	<b>0.41</b>	<b>584.93</b>	<b>93.58</b>
<b>DP</b>	<b>0.50</b>	<b>11.71</b>	<b>4.69</b>	<b>0.64</b>	<b>24.19</b>	<b>9.67</b>
<b>Cv</b>	<b>13.99</b>	<b>39.48</b>	<b>39.70</b>	<b>14.00</b>	<b>39.73</b>	<b>39.73</b>

**Tabela 2:** Análise estatística feita as médias de velocidade e potência disponível as 15 horas do mês de Setembro de 2000, para Maputo e Inhaca.

<b>Estação</b>	<b>Inhaca</b>	<b>Maputo</b>	<b>Inhaca</b>	<b>Maputo</b>
<b>Dias</b>	<b>V(m/s)</b>	<b>V(m/s)</b>	<b>P(w/m<sup>2</sup>)</b>	<b>P(w/m<sup>2</sup>)</b>
1	6.49	2.78	167.28	13.16
2	4.86	3.06	70.48	17.52
3	5.75	3.61	116.50	28.91
4	4.79	4.73	67.27	64.65
5	2.84	3.06	13.96	17.52
6	8.53	2.78	380.15	13.16
7	5.60	1.11	107.68	0.84
8	6.15	2.78	142.26	13.16
9	6.45	4.73	164.20	64.65
10	5.10	7.78	81.06	288.88
11	8.48	5.28	373.50	90.26
12	5.74	1.67	115.53	2.84
13	6.97	2.78	207.76	13.16
14	6.18	2.78	144.85	13.16
15	4.18	3.61	44.73	28.91
16	5.18	1.67	85.33	2.84
17	5.54	1.95	103.98	4.51
18	4.85	1.11	69.79	0.84
19	4.58	1.11	58.65	0.84
20	3.64	2.78	29.54	13.16
21	4.13	4.73	43.18	64.65
22	4.27	1.67	47.79	2.84
23	6.97	5.00	207.40	76.75
24	5.67	3.06	111.35	17.52
25	6.62	1.11	177.29	0.84
26	4.09	3.61	41.97	28.91
27	7.81	1.11	291.78	0.84
28	4.77			
29	6.95			
30	3.48	6.12	25.77	140.12
<b>Média</b>	<b>5.55</b>	<b>3.13</b>	<b>124.68</b>	<b>36.62</b>
<b>Mediana</b>	<b>5.57</b>	<b>2.78</b>	<b>107.68</b>	<b>13.16</b>
<b>Min</b>	<b>2.84</b>	<b>1.11</b>	<b>13.96</b>	<b>0.84</b>
<b>Max</b>	<b>8.53</b>	<b>7.78</b>	<b>380.15</b>	<b>288.88</b>
<b>Var</b>	<b>2.02</b>	<b>2.81</b>	<b>9284.81</b>	<b>3578.57</b>
<b>DP</b>	<b>1.42</b>	<b>1.68</b>	<b>96.36</b>	<b>59.82</b>
<b>Cv</b>	<b>25.60</b>	<b>53.64</b>	<b>77.28</b>	<b>163.34</b>

**Table 3:** Resumo das análises de direcção e frequência de velocidade durante os diferentes intervalos de tempo estudados.

<b>Período</b>	<b>Direcção predominante (DP)</b>	<b>Classe de Velocidade mais frequente (m/s)</b>
Janeiro	Sudoeste	4-6
Fevereiro	Sudoeste, Sudeste	4-6
Março	Sudoeste, Sudeste	2-4
Abril	Sudoeste	2-4
Mai	Sudoeste, Nordeste	2-4
Junho	Nordeste, Sudoeste	2-4
Julho	Sudoeste, Norte	2-4
Agosto	Nordeste, Sudoeste	2-4
Setembro	Sudoeste, Nordeste	4-6
Outubro	Leste, Nordeste, Sudeste, Sudoeste	4-6
Novembro	Leste, Sudoeste	4-6
Dezembro	Sudoeste, Nordeste	4-6
06 as 17 horas	Sudoeste	4-6
18 as 05 horas	Sudoeste, Leste, Nordeste	2-4
Verão	Sudeste, Leste, Nordeste	4-6
Inverno	Sudoeste	2-4
Anual	Sudoeste	2-6

1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77  
78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89  
90  
91  
92  
93  
94  
95  
96  
97  
98  
99  
100