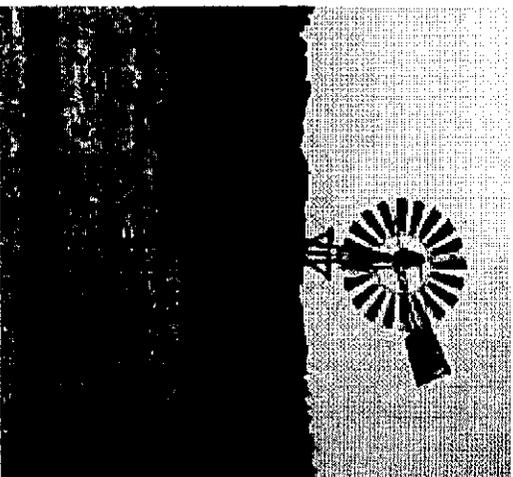




UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

EXAME DE ESTADO

RECURSOS DE ENERGIA EÓLICA



Autor : Luís André Magaia

Maputo, Setembro de 2004

RECURSOS DE ENERGIA EÓLICA

Dedicatória

Aos meus pais André e Maria Clara,
ao meu filho Andrezinho,
à minha noiva Rosinha
e aos meus irmãos.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram a realizar este relatório, indicando assim o fim de uma das fases mais importantes da vida.

Agradeço:

- A Deus por ter me sustentado nesta difícil caminhada, me renovando a cada dia.
- Aos docentes do departamento de física, pela assistência prestada durante a realização do curso em particular: Prof. Doutor. Maphossa, Prof. Doutor. Utui, Prof. Doutor. Mutinnuicuo, Prof. Doutor. Burdeiny, Prof. Doutor. Tchenyechi, Prof. Doutor. Akl, Prof. Doutor Rakov, Prof. Doutor. Cuamba, dr. Genito, dr. Mahumana, dr. Chenene e ao dr. Cláudio.
- Ao corpo técnico e administrativo do departamento de física, pelo apoio prestado ao longo do curso.
- Aos meus colegas Moiane, Marrenjo, Sicoé, Badru, Meque, Matuele pela disponibilidade permanente oferecida na resolução de questões por mim colocadas.
- Aos meus pais e meus irmãos por todo o amor, impulso e muita paciência que dedicaram a todos nós da família durante toda a nossa vida.

Conteúdo

1	Introdução e Objectivos	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objectivos	2
2	Fundamentos teóricos	3
2.1	Energia eólica	3
2.2	O vento	3
2.3	Forças que afectam o vento	4
2.3.1	Força de gradiente de pressão	4
2.3.2	Força de Coriolis	5
2.3.3	Força centrífuga	5
2.3.4	Força de atrito	5
2.4	Representação do regime de vento (Distribuição de Weibull)	6
2.5	Variação da velocidade do vento com a altura (Lei de Prandtl)	7
2.6	Medição da direcção e velocidade do vento	9
2.7	Comportamento do vento em Moçambique	9
2.8	Cálculo da potência eólica	10
2.9	Cálculo do coeficiente de potência C_p	11
2.10	Aplicações do recurso eólico	13
2.11	Vantagens e desvantagens da energia eólica	14
2.12	Metodologia	14

3 Conclusões e Recomendações	15
3.1 Conclusões	15
3.2 Recomendações	15
Referências Bibliográficas	16
Anexos	18

Lista de símbolos usados

- m – massa [Kg]
- α – coeficiente de fricção
- Ω – velocidade angular da terra [2π em 24 Horas]
- φ – latitude
- ρ – densidade do meio [Kg/m³]
- $F(\bar{u})$ e $f(\bar{u})$ – função probabilidade acumulada e densidade de probabilidade de Weibull
- z_0 – comprimento característico da rugosidade do solo
- \bar{u} e u_* – velocidade média e de atrito do vento [m/s]

Resumo

A distribuição dos recursos naturais na Terra é determinada por fenómenos meteorológicos e geofísicos. O conhecimento dos mecanismos que influenciam o recurso eólico existente numa dada região é de grande importância para a avaliação da energia eólica como recurso energético. A teoria mostra que a potência eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento, o que acentua a importância na escolha do local de estudo e na avaliação dos dados. Este recurso eólico apresenta uma densidade de energia muito baixa em relação às energias de recursos fósseis e fontes de energia nuclear mas é uma fonte abundante. Neste trabalho, faz-se o estudo deste recurso eólico, dando uma abordagem da formação do vento e das forças que actuam nele. Considera ainda a variação da velocidade do vento com a altura, a função de distribuição estatística de Weibull que é de grande importância na descrição analítica dos regimes do vento.

Capítulo 1

Introdução e Objectivos

1.1 Introdução

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

Neste contexto aparecem as fontes de energias renováveis como alternativas, à sua escala e numa forma complementar: às fontes de energias convencionais.

Acredita-se de acordo com as investigações, que a maior parte das necessidades da energia que se consome na Terra pode ser fornecida a partir de fontes de energias renováveis. Se tal for verdade, a exploração deste recurso energético mostrar-se-ia como a principal alternativa para reduzir as emissões de CO_2 .

É neste contexto, que o estudo das tecnologias de conversão de energia do recurso eólico torna-se necessário e é de grande importância na actualidade. Este recurso energético renovável é mais abundante e limpa que aparece como alternativa na produção da energia mecânica e eléctrica.

Mas como é de esperar, nem toda esta energia está disponível. Como as torres dos aerogeradores têm uma altura de várias dezenas de metros, apenas podem captar uma pequena fracção dessa energia. Para além disso, nem todas as zonas terrestres são acessíveis à captação dessa energia.

O uso do recurso de energia eólica torna-se vantajoso em pequena escala, por exemplo, em áreas remotas onde a rede eléctrica não abrange. Mas como a energia eólica é notoriamente instável e intermitente, o seu aproveitamento requer um sistema de armazenamento.

1.2 Objectivos

- Aplicar os conhecimentos teóricos sobre a energia eólica, para poder avaliar o seu potencial.
- Entender as possibilidades e limitações da aplicação do recurso eólico em Moçambique.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1 Energia eólica

A energia eólica resulta da transformação da parte do efeito térmico solar em energia cinética da atmosfera. Ela é obtida pelo movimento do ar (vento) [3].

O princípio é simples, o vento passa pelas pás da hélice fazendo com que ela gire, esta hélice tem um eixo que está conectado a uma turbina. Por sua vez a turbina produz a energia mecânica que pode ser transformada em energia eléctrica.

A energia eólica é uma abundante fonte de energia renovável. limpa e disponível em todos os lugares.

2.2 O vento

Os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros factores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra (Cunha 1972).

A variação do ângulo de incidência dos raios solares à superfície entre as zonas polares, onde é tangencial, e as zonas equatoriais, onde é perpendicular, provoca grandes diferenças de temperatura. Consequentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos [2]. A figura no anexo I, apresenta esse mecanismo.

Os movimentos verticais do ar são designados por correntes, assim tem-se correntes ascendentes e descendentes. Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de 23. 5° em relação ao plano de sua órbita em torno do Sol, variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra resultam em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos, em qualquer local da superfície terrestre. Como resultado surgem os ventos continentais ou periódicos que compreendem as monções e as brisas (anexo 2) [2].

2.3 Forças que afectam o vento

Por conveniência de estudo, imaginemos o vento como uma corrente contínua de parcelas de ar. Consequentemente, ao examinarmos cada força que influencia o movimento do ar, estaremos examinando a força por unidade de massa de ar. Uma força por unidade de massa é numericamente igual a uma aceleração, conforme a segunda Lei de Newton para o movimento:

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad (2.1)$$

As forças actuando sobre parcelas de ar são: a força de gradiente de pressão, a força de Coriolis, a força centrífuga e a força de atrito.

2.3.1 Força de gradiente de pressão

Devido a desigual distribuição da pressão atmosférica, uma partícula de ar fica sujeita a uma força chamada de gradiente de pressão que tende a movê-la das altas para as baixas pressões. O gradiente horizontal de pressão é definido pelo decréscimo da pressão atmosférica por unidade de distância, medido normalmente às isóbaras e na direcção em que a pressão decresce com mais rapidez. O gradiente de pressão é normal às isóbaras, dirigido das altas para as baixas pressões e inversamente proporcional à distância entre as isóbaras [2].

Assim, a componente n da força de gradiente de pressão por massa unitária é [2]:

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n} \quad (2.2)$$

Em suma, o gradiente horizontal de pressão é a força geradora do vento. Quando o ar começa a se mover, a força de Coriolis, o atrito e eventualmente a força centrífuga começam a agir, mas somente para modificar o movimento, não para produzi-lo.

2.3.2 Força de Coriolis

A força de Coriolis actua segundo a Lei de Ferrel: "todo corpo ou fluído movendo-se horizontalmente tende a desviar-se para a direita da sua trajectória no hemisfério norte e para esquerda no hemisfério sul, independentemente da direcção do seu movimento" (Cunha 1972). É por causa desta força que grandes camadas de ar entram em movimento de rotação originando os ciclones; ciclones que giram no sentido anti-horário no hemisfério norte e no sentido horário no hemisfério sul.

Esta força não é uma força real, mas sim aparente, pois não envolve qualquer ganho ou perda de energia, representando o resultado de dois movimentos: (a) o movimento de rotação da Terra; (b) o movimento do corpo em relação à rotação da Terra. Devemos, portanto, ter em conta que o vento observado representa sempre o movimento do ar relativo a rotação da Terra (Cunha 1972).

Segundo Cunha (1972), o efeito da rotação da Terra sobre a direcção do vento é expresso pela expressão:

$$F_{co} = 2\rho u\Omega \sin\varphi \quad (2.3)$$

2.3.3 Força centrífuga

Quando a trajectória de uma partícula de ar em movimento é curvilínea actua também sobre ela a força centrífuga, também chamada força ciclostrófica, que por unidade de volume se exprime pela expressão [2]:

$$F_c = \frac{\rho u^2}{r} \quad (2.4)$$

Esta força é em geral, de pequena importância sobre a direcção do vento, porquanto o raio de curvatura (r) é normalmente muito grande, podendo atingir muitos milhares de quilómetros. Ela só é importante quando o raio de curvatura é relativamente pequena como sucede em depressões muito cavadas, designadamente em ciclones tropicais (Cunha 1972).

2.3.4 Força de atrito

O efeito de atrito diminui com a altitude e a cerca de 1000m os seus efeitos são já desprezíveis. Acima dessa altitude os ventos sopram, portanto, paralelamente às isóbaras, isto é, são ventos geostróficos. Ele actua para freiar o movimento do ar. Como a força de Coriolis é

proporcional à velocidade do vento, ao diminuir esta velocidade o atrito reduz a força de Coriolis. Como a força de gradiente de pressão não é afectada pela velocidade do vento, surge um desequilíbrio entre a força de gradiente de pressão e a força de Coriolis, a favor da primeira. Portanto, o ar cruzará as isóbaras em direcção à área de menor pressão. O ângulo de cruzamento dependerá da magnitude do atrito: em torno de 10° sobre os oceanos, onde há menos atrito até 45° sobre terreno rugoso [2].

Segundo Cunha (1972), devido a força de atrito a direcção do vento faz um ângulo (α) com o gradiente de pressão expresso pela fórmula:

$$tg\alpha = \frac{2\Omega sen\varphi}{k} \quad (2.5)$$

em que K é o coeficiente de atrito.

2.4 Representação do regime de vento (Distribuição de Weibull)

Segundo Patel (1999) a distribuição de *Weibull* é normalmente considerada como a mais adequada das distribuições probabilísticas para descrever o regime de ventos e, é descrita analiticamente por duas funções matemáticas:

1. Função probabilidade acumulada de Weibull $F(u)$ indicando a probabilidade de ocorrência de vento com velocidade u' maior ou igual a u ;

$$F(u) = P(u \leq u') \quad (2.6)$$

2. Função densidade de probabilidade,

$$f(u) = \frac{dF(u)}{du} \quad (2.7)$$

Estas duas funções $F(u)$ e $f(u)$ podem ser escritas da seguinte forma [6]:

$$F(u) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \quad (2.8)$$

$$f(u) = \frac{dF(u)}{du} = \frac{k}{c} \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right] \quad (2.9)$$

onde: k =parâmetro de forma (adimensional) e c =parâmetro de escala. (m/s).

A velocidade média \bar{u} pode ser descrita por:

$$\bar{u} = \sum u f(u) \quad (2.10)$$

Segundo Shepherd (1983), o parâmetro de forma k , encontra-se compreendido entre os valores 1.5 e 3.5 em última instância. Os anexos 5 e 6 apresentam exemplos de diferentes gráficos da distribuição de Weibull.

Para $k = 1$ tem-se uma distribuição exponencial e quando $k > 3$ tem-se uma distribuição que se aproxima da distribuição normal.

Para $k = 2$ a distribuição de Weibull reduz-se à distribuição uni-paramétrica de Rayleigh.

$$f(u) = \frac{\pi}{2} \frac{u}{\bar{u}^2} \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{u}{\bar{u}} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Shepherd (1983) afirma que uma aplicação útil da distribuição de Rayleigh ocorre na fase em que não se dispõem de dados experimentais e se pretende caracterizar sumariamente um local, unicamente a partir da velocidade média anual.

2.5 Variação da velocidade do vento com a altura (Lei de Prandtl)

O atrito entre a superfície terrestre e o vento tem como consequência um retardamento deste último. As camadas mais baixas de ar retardam as que lhe estão por cima, resultando numa variação da velocidade média do vento com a altura ao solo [1].

Segundo Shepherd (1983), no solo a condição de fronteira obriga que a velocidade de escoamento seja nula. A zona da atmosfera caracterizada pela variação da velocidade do vento com a altura chama-se camada limite atmosférica, acima desta zona diz-se que a atmosfera é livre. A região da camada limite atmosférica se estende até uma altura de 100m (camada superficial) que é a zona de interesse para as turbinas eólicas. Nesta zona, a topografia do terreno e a rugosidade do solo condicionam fortemente o perfil de velocidades do vento (veja a tabela: 2.1), assim a variação da velocidade de vento com a altura do solo pode ser expressa pela fórmula empírica [1]:

$$u(h) = u_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^a \quad (2.12)$$

a expressão efectiva é obtida com os valores de α dados pela expressão:

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \ln u_1}{1 - 0.088 \ln \left(\frac{h_1}{10} \right)} \quad (2.13)$$

Assim, se obtém a lei logarítmica de *Prandtl* válida com alto grau de aproximação, em condições adiabáticas:

$$\bar{u}(h) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{h}{z_0} \right) \quad (2.14)$$

Segundo a fonte [1], a constante de *Von Karman* k é igual a 0,4.

A expressão anterior (2.14) leva em consideração apenas a influência da rugosidade no perfil de velocidade, negligenciando o efeito da estratificação térmica da atmosfera e, portanto, desvios significativos podem ocorrer em relação ao perfil de velocidade real da atmosfera.

Na prática usa-se a equação seguinte:

$$\frac{\bar{u}(h)}{\bar{u}(h_1)} = \frac{\ln \left(\frac{h}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{h_1}{z_0} \right)} \quad (2.15)$$

em que $\bar{u}(h_1)$ é a velocidade média à altura de referência h_1 [1].

Tabela 2.1: Valores típicos do comprimento característico da rugosidade do solo z_0 e do coeficiente de fricção α .

Tipo de terreno	Exemplo	$z_0(m)$	α
plano	praias, gelo, neve, oceanos	0.005	0.10
	relevado baixo, campos, aeroportos	0.03	0.15
aberto	areia, relevado alto, culturas baixas	0.10	
rugoso	cultura de cereais, bosque, arbustos	0.25	0.20
	muito rugoso	florestas, pomares	0.50
fechado	vilas, subúrbios	1.00	0.30
ciudades	centro de cidades	> 2	0.40

Fonte: Adaptado das fontes [4] e [5].

Vale a pena realçar que o valor de z_0 pode variar com a direcção do vento e, também, entre os meses de verão e de inverno; isso deve ser tomado em consideração quando se analisam as características de um local [1].

2.6 Medição da direcção e velocidade do vento

O vento é caracterizado por duas grandezas variáveis em relação ao tempo, a direcção e a velocidade ou a força do vento. As variações destas duas grandezas obedecem a fenómenos de naturezas diversas: as variações instantâneas (rajadas ou turbulências) e as variações diárias e sazonais [1].

A direcção do vento observa-se pelo ponto donde ele sopra, por meio dos 4 pontos cardeais e intermédios, usando-se um catavento constituído por uma bandeira metálica bem equilibrada montada numa haste vertical (Cunha 1972).

Para a medição da componente horizontal da velocidade do vento são utilizados anemómetros e anemógrafos. Os dois sensores consistem de dois dispositivos: o rotor e o gerador do sinal. Na ausência destes instrumentos, avalia-se por estimativas segundo a escala de Beaufort (anexo 7). A correspondência entre a força F do vento na escala de Beaufort e a velocidade v em m/s é dada com bastante aproximação pela fórmula (Cunha 1972):

$$F^3 = 1,43v^2 \quad (2.16)$$

2.7 Comportamento do vento em Moçambique

Segundo Cunha (1972), o regime dos ventos em Moçambique é essencialmente influenciado pela circulação da atmosfera na África meridional que por sua vez está condicionada por vários centros de acção cujos principais, em relação a Moçambique são: (i) o anticiclone subtropical do Índico; (ii) a cintura de baixas pressões equatoriais (zona de convergência intertropical); (iii) a depressão de origem térmica que se desenvolve sobre o continente na época quente; (iv) um anticiclone de origem térmica que se estabelece na época seca na parte meridional do continente africano; (v) os vales depressionários que acompanham o movimento das depressões subpolares que afectam por vezes as regiões do litoral das províncias de Maputo, Gaza e Inhambane.

Em quase todo o litoral de Moçambique, o vento tem velocidades médias da ordem dos $10km/h$, atingindo os valores mais altos, da ordem dos $15km/h$, na ponta sul do País. Já no interior, o vento diminui de velocidade atingindo os valores mais baixos da ordem dos $4-6km/h$ nas províncias de Zambézia, Tete e Gaza, com excepção das regiões montanhosas

do Niassa onde é aproximadamente de 10km/h (Cunha 1972).

2.8 Cálculo da potência eólica

A massa do fluxo de ar que se desloca com velocidade u através de uma área A é dada por [3] e [4]:

$$m = \rho Au \quad (2.17)$$

e a sua energia cinética por segundo é:

$$P_{cin} = \frac{1}{2} (\rho Au) u^2 = \frac{1}{2} \rho Au^3 \quad (2.18)$$

Apartir desta relação conclui-se que:

- A potência eólica é proporcional a densidade do ar. A densidade do ar, por sua vez é compreendida entre $0.7kg/m^3$ nas altas latitudes até $1.2kg/m^3$ no nível do mar.
- A potência eólica é proporcional a área varrida pelas pás da turbina, isto é, ao quadrado do diâmetro do rotor.
- A potência eólica é proporcional ao cubo da velocidade do vento, daí que é preciso muita atenção na seleção do local para a instalação das turbinas eólicas.

Da equação (2.12), pode-se ver que em um mesmo lugar a potência de energia possível de se obter com uma máquina eólica também depende da altura na qual está o rotor da turbina. Em outras palavras, quanto mais alta a torre mais energia se obtém.

Segundo Patel (1999), a potência entregue não pode ser aproveitada na sua totalidade pois, se se remove toda a energia cinética, pára-se o vento. A máxima energia extrairável pelo rotor é reduzido a $\frac{2}{3}u$. Então atrás das pás da turbina temos $\frac{1}{3}u$, e assim o limite máximo teórico da potência extraída P_{max} é:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3} \rho Au \right) u^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3} \rho Au \right) \left(\frac{1}{3} u \right)^2 \quad (2.19)$$

$$P_{max} = \frac{116}{227} \rho Au^3 \quad (2.20)$$

Em suma, apenas uma fração máxima de cerca de 16/27 (59.3%) da energia cinética do vento pode ser extraída por uma turbina eólica. Este valor máximo é conhecido por limite de Bertz geralmente descrita por coeficiente de potência C_p [4].

2.9 Cálculo do coeficiente de potência C_p

Em um estado não perturbado, uma coluna de ar que passa pela turbina com área de seção A_1 , tem uma energia cinética por unidade de tempo igual a [3]:

$$P_0 = \frac{1}{2}(\rho A_1 u_0) u_0^2 = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^3 \quad (2.21)$$

Consideremos uma coluna de ar de seção não uniforme segundo o modelo de Bertz. A re-

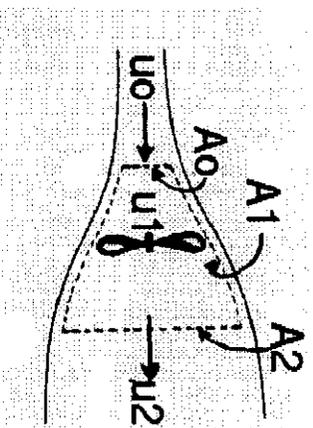


Figura 2.1: Modelo de Bertz para um fluxo de ar em expansão

(Fonte: Twidell e Weir 1986)

locidade do ar depende das seções, quanto menor for a área maior é a respectiva velocidade e vice-versa. O momento da força é dada pela expressão:

$$F = \dot{m}u_0 - \dot{m}u_2 \quad (2.22)$$

Assumindo que o fluxo de ar dentro da coluna tem uma velocidade uniforme u_1 tem-se a potência extraída na turbina dada por:

$$P_T = F u_1 = \dot{m}(u_0 - u_2)u_1 \quad (2.23)$$

A energia cinética que se perde por unidade de tempo é dada por:

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m}(u_0^2 - u_2^2) \quad (2.24)$$

Iguando (2.23) e (2.24) decorre:

$$(u_0 - u_2)u_1 = \frac{1}{2}(u_0 - u_2)(u_0 + u_2) \quad (2.25)$$

então:

$$u_1 = \frac{u_0 + u_2}{2} \quad (2.26)$$

A massa do fluxo de ar dentro do disco (secção 1) por unidade de tempo é igual a:

$$\dot{m} = \rho A_1 u_1 \quad (2.27)$$

assim de (2.23) tem-se:

$$P_T = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_2) \quad (2.28)$$

Segundo (2.26) decorre que

$$u_2 = 2u_1 - u_0 \quad (2.29)$$

e assim:

$$P_T = \rho A_1 u_1^2 (u_0 - 2u_1 + u_0) = 2\rho A_1 u_1^2 (u_0 - u_1) \quad (2.30)$$

O *factor de interferência* (a) é dado pelo decréscimo fraccional da velocidade do vento na turbina [3]:

$$a = \frac{u_0 - u_1}{u_0} \quad (2.31)$$

e assim:

$$u_1 = u_0(1 - a) \quad (2.32)$$

Em (2.30) substituindo (2.32) decorre:

$$P_T = 2\rho A_1 (1 - a)^2 u_0^2 [u_0 - (1 - a)u_0] = [4a(1 - a)^2] \left(\frac{1}{2}\rho A_1 u_0^3\right) \quad (2.33)$$

Comparando (2.33) com (2.21) segue que:

$$P_T = C_p P_0 \quad (2.34)$$

onde P_0 é a potência disponível no vento, e C_p é a fracção da potência extraída (coeficiente de potência):

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (2.35)$$

O máximo valor de C_p ocorre quando $a = \frac{1}{3}$ (veja a figura: 2.2).

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} = 0,59 \quad (2.36)$$

O critério de máxima potência extraída ($C_{p_{max}} = 16/27$) pode ser aplicado a todos tipos de turbinas [3].

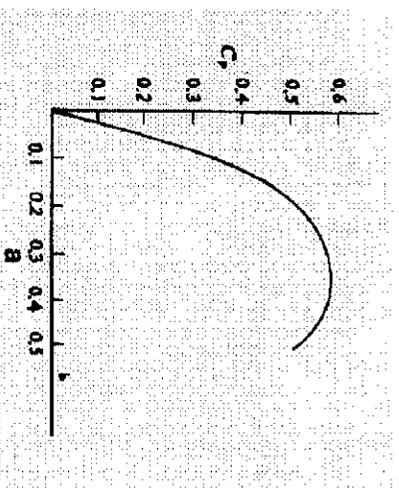


Figura 2.2: Gráfico da função $C_p = 4a(1 - a)^2$ onde o valor máximo de $C_p = 16/27$ para $a = 1/3$. (Fonte: Tirdell e Weir, 1986)

2.10 Aplicações do recurso eólico

A energia cinética, resultante das deslocações das massas de ar, pode ser transformada em: *energia mecânica* através de *aeromotores* e em *energia eléctrica* através de *turbinas eólicas* ou *aerogeradores*.

Segundo a fonte [9], um sistema eólico pode ser utilizado em três aplicações distintas, obedecendo uma configuração básica e uma unidade de controlo de potência e, em determinados casos, conforme a aplicação, é preciso uma unidade de armazenamento.

- *Sistemas isolados*- em geral são de pequeno porte, utilizam alguma forma de armazenamento de energia. Este armazenamento pode ser feito através de baterias ou na forma de energia potencial gravitacional com a finalidade de armazenar a água bombeada em reservatórios elevados para posterior utilização. Alguns sistemas isolados não necessitam de armazenamento, como no caso dos sistemas para irrigação onde toda a água bombeada é directamente consumida [9].
- *Sistemas híbridos*- são aqueles que apresentam mais de uma fonte de energia como, por exemplo, turbinas eólicas, geradores Diesel, módulos fotovoltaicos, entre outras. Em geral, os sistemas híbridos são empregados em sistemas de médio porte destinados a atender um número maior de usuários. Por trabalhar com cargas em corrente alternada, o sistema híbrido também necessita de um inversor [9].

- *Sistemas interligados à rede*- estes não necessitam de sistemas de armazenamento de

energia pois toda a geração é entregue directamente à rede eléctrica. Estes sistemas representam uma fonte complementar ao sistema eléctrico de grande porte ao qual estão interligados. Estes sistemas, apresentam as vantagens inerentes aos sistemas de geração distribuída tais como: a redução de perdas e o custo evitado na expansão de rede [9].

2.11 Vantagens e desvantagens da energia eólica

A energia do recurso eólico apresenta muitas vantagens porque não consome combustíveis, é limpa e abundante, é um dos sistemas mais seguro, apresentando uma boa vida útil com baixo impacto ambiental e o custo de produção competitivo. Suas instalações são móveis e apenas uma pequena percentagem do espaço onde é instalado o parque eólico fica efectivamente ocupado, assim a terra não fica comprometido e o seu desmantelamento permite recuperar totalmente toda a zona [6].

Suas desvantagens residem na emissão de ruídos, impacto visual, interferências electro-magnéticas e ao único impacto ambiental quando instalados em zonas de migração das aves [6]. Estas desvantagens podem ser evitadas através da escolha criteriosa do local de instalação.

2.12 Metodologia

Para que o presente trabalho se torne uma realidade, foi levado a cabo uma intensa revisão bibliográfica sobre o recurso eólico.

Capítulo 3

Conclusões e Recomendações

3.1 Conclusões

- A potência de energia eólica é directamente proporcional a densidade do ar e a área varrida pelo rotor, e ainda proporcional ao cubo da velocidade do vento.
- A potência de energia possível de se obter com um aeromotor depende do coeficiente de potência C_p , da turbina e da altura do mesmo, quanto mais alta a torre mais energia eólica se obtém.
- Em Moçambique as condições não são, de uma maneira geral, favoráveis ao aproveitamento da energia do vento, em face da pequena velocidade desse elemento meteorológico.

3.2 Recomendações

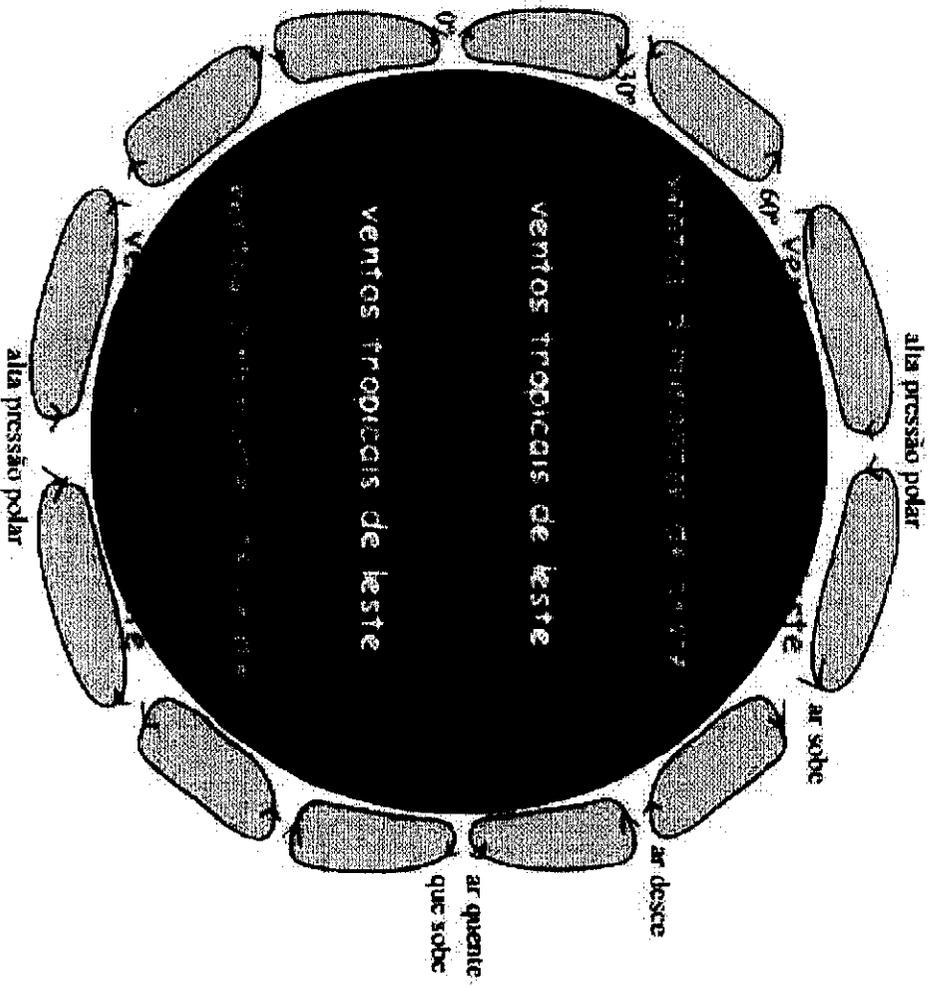
- Devido a grande importância, que a energia eólica representa como recurso energético renovável, torna-se necessário realizar-se estudos envolvendo dados concretos da velocidade do vento e que se faça uma avaliação do potencial eólico em toda a região de Moçambique.
- É necessário que se faça o mapeamento dos recursos de energia eólica no espaço e no tempo para o território Moçambicano.

Referências Bibliográficas

- [1] CASTRO, R.M.G. *Energias Renováveis e Produção Descentralizada, Introdução à Energia Eólica*. [online] Disponível na internet via WWW. URL: <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/egouveia/PTDDE%5Csubpag.htm>. Capturado em Dezembro de 2003.
- [2] Cunha, F. R. (1972). *Meteorologia Geral e Agrícola-1@ parte*. pp 284-373. (Lições da Cadeira de Mesologia e Meteorologia Agrícolas). Universidade de Lourenço Marques, Cursos Superiores de Agronomia e Silvicultura.
- [3] Twidell, J., T. Weir (1986). *Renewable Energy Resources*, pp 1-242. FN SPON- 1st edition. London.
- [4] Patel, M. R. (1999). *Wind and Solar Power Systems*, 351 pp. Library of Congress Cataloging- in-Publication Data, CRC Press edition, U.S.Merchant Marine Academy.
- [5] SADC Project AAA 5.17. *Rural Energy Planning and Environmental Management Training Programme*. Southern African Development Community Energy Sector Technical and Administrative Unit, P.O.Box 2876 Luanda.
- [6] Shepherd, D.G. (1983). *Handbook of Energy Technology and Economics*. pp 826-876. Wiley -Interscience publisher, USA, John Wiley and Sons edition.
- [7] SILVA, S.R. *Energia Eólica*. [online] Disponível na internet via WWW. URL: <http://www.gpdee.ufmg.br/selarios/Geracao/Energia%20Eolica2003.pdf>. Capturado em Dezembro de 2003.

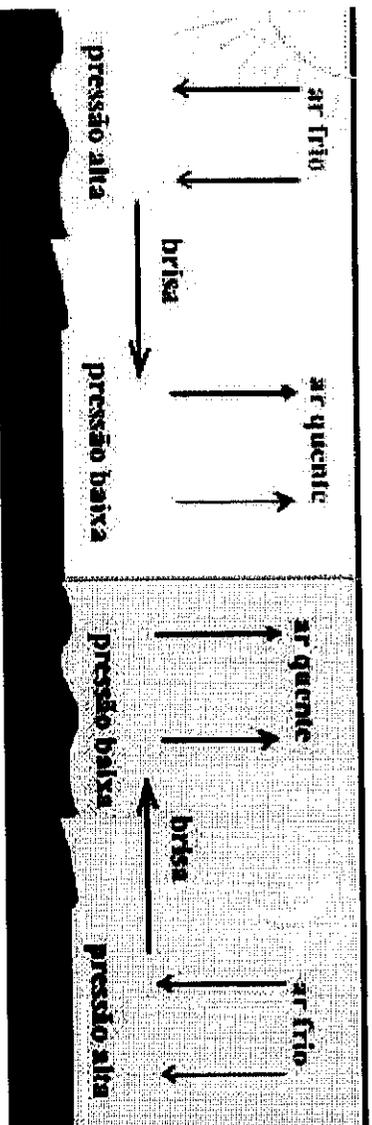
- [8] TABORA, D. e N. MARQUES. *Construção de um Parque Eólico e sua Ligação à Rede.* [online] Disponível na internet via WWW. URL: <http://thor.deec.nc.pt/ppee/docs0203/eoliccolig.pdf>. Capturado em Dezembro de 2003.
- [9] Tutorial: *Energia Eólica.* [online] Disponível na internet via WWW. URL: <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/eolica/apstenergiacolica.htm>. Capturado em 1 de Junho de 2004.

Anexos



Anexo 1: Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

Fonte: <http://to-campos.planetaclix.pt/nuvensI/ventos/ventosI.htm>



Anexo 2: Formação das brisas marítima e terrestre respectivamente.

Fonte: <http://to-campos.planetaclix.pt/nuvens1/ventos/ventos.htm>

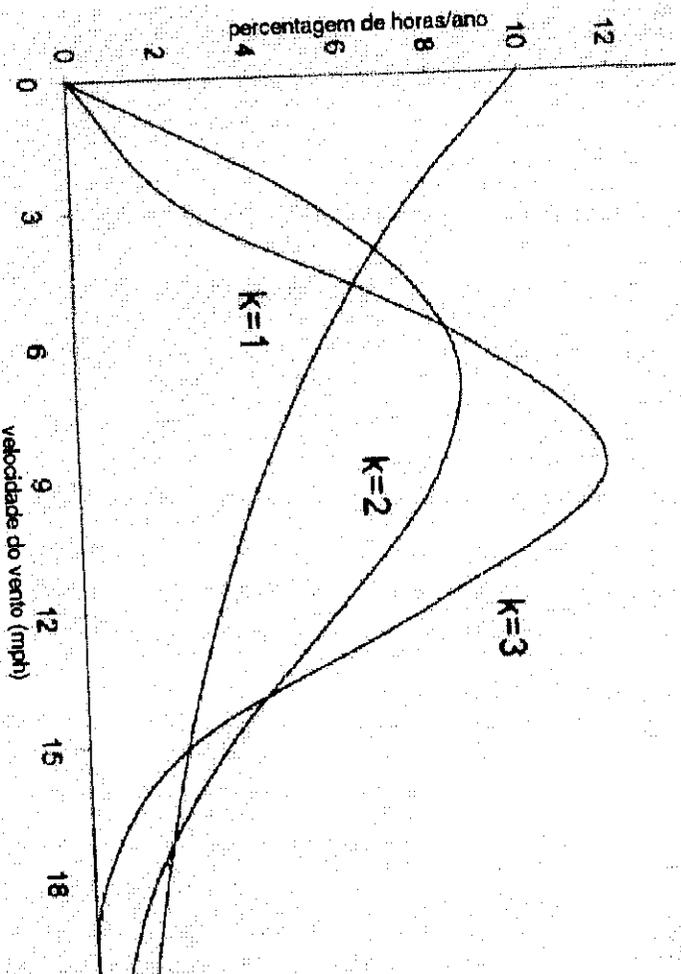
Anexo 3: Equivalências úteis da velocidade do vento (Fonte:[1]).

m/s	km/h	mph	nó
1	3,6	2,237	1,944

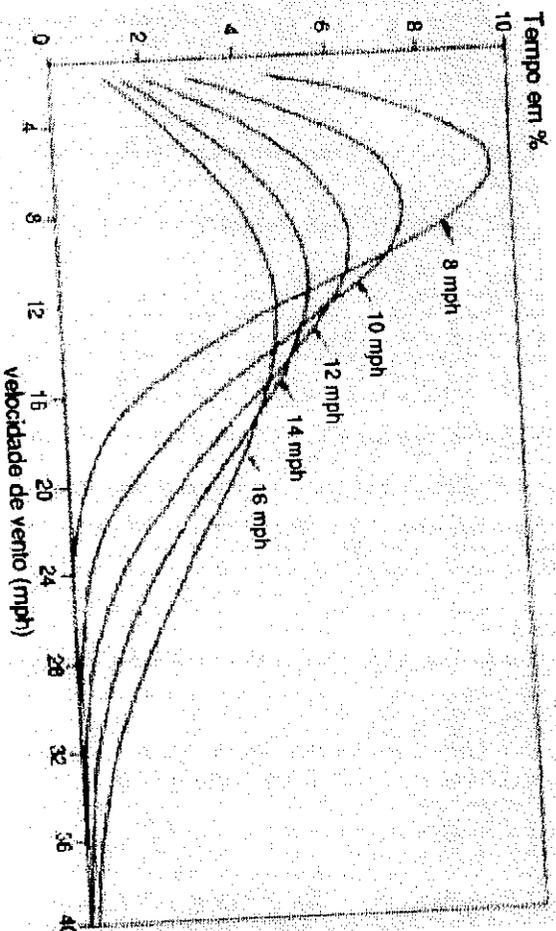
Anexo 4: Massa específica do ar à pressão normal (Fonte:[1]).

Temperatura em °C	Temperatura em °F	Densidade kg/m ³
-15	5	1.368
-10	14	1.342
-5	23	1.317
0	32	1.292
5	41	1.269
10	50	1.247
15	59	1.225*)
20	68	1.204
25	77	1.184
30	86	1.165
35	95	1.146
40	104	1.127

*)Densidade padrão do ar seco medido ao nível do mar.



Anexo 5: Função de distribuição de probabilidade de Weibull com o parâmetro de escala $c = 10$ e o parâmetro de forma $k=1, 2$ e 3 (fonte: Patel 1999).



Anexo 6: Distribuição de probabilidade de Weibull com o parâmetro de forma $k = 2$ e o parâmetro de escala variando de 8 até 16 mph (fonte: Patel 1999).

Anexo 7: Escala de Beaufort, usado para a classificação da velocidade do vento.

Força	Designação	Descrição (em terra)	Velocidade (km/h)
0	Calma	Calma; o fumo eleva-se verticalmente; folhas imóveis.	1
1	Aragem	A direcção do vento é indicada pelo desvio do fumo, mas não pelos cataventos.	1 a 5
2	Vento muito fraco	Sente-se o vento na cara; as folhas das árvores mexem-se; os cataventos são desviados.	6 a 11
3	Vento fraco	As folhas das árvores em constante agitação; o vento desdobra as bandeiras leves.	12 a 19
4	Vento moderado	Levanta poeira e papéis soltos; os ramos pequenos das árvores em agitação.	20 a 28
5	Vento fresco	Os arbustos com folhas começam agitar-se; formam-se pequenas ondas nas superfícies das águas interiores.	29 a 38
6	Vento muito fresco	Ramos grandes das árvores em agitação; ouve-se o vento nos fios telegráficos; é difícil andar de guarda-chuva.	39 a 49
7	Vento forte	Árvores inteiras em agitação; é difícil caminhar contra o vento.	50 a 61
8	Vento muito forte	Parte alguns ramos das árvores; em geral impede o trânsito.	62 a 74
9	Vento tempestuoso	Produzem-se pequenos estragos nas casas (chaminés arvariadas e telhas arrancadas).	75 a 88
10	Temporal	Poucas vezes se observa em terra; árvores arrancadas; grandes estragos nas casas.	89 a 102
11	Temporal desfeito	Muito raro; grandes estragos gerais.	103 a 117
12	Furacão	Idem, de maior intensidade.	> 117

Fonte: Cunha (1972).