



**UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE**



**FACULDADE DE CIÊNCIAS**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA**

Curso de Licenciatura em Física (ramo aplicado)

**EXAME DE ESTADO**

**Recursos de Energias Eólica**

Candidato: José Stanley Elfo Chemane

Maputo, Dezembro de 2010

DECLARAÇÃO DE HONRA

Este trabalho foi completamente realizado com base no material que ao longo do mesmo se fez referência. As ideias originais nele expressas, são de inteira responsabilidade do autor.

Maputo, Dezembro de 2010

O autor

---

(José Stanley Elfo Chemane)

## AGRADECIMENTOS

A Deus,

Por atender a todo pedido de ajuda e me dar as forças necessárias

Ao Prof. Doutor Boaventura Chongo cuamba, seus assistentes docentes da (UEM) pelas críticas e apoio científico prestados durante a preparação do presente trabalho.

Aos docentes do departamento de física no geral pela assistência prestada e sugestões ao longo do curso.

Aos meus pais: António José Chemane e Olga Erasma Chemane pelo apoio moral, financeiro e tantas coisas que nem saberia expressar.

Aos meus irmãos: Kevina Chemane, Elfos Chemane, Erasma Chemane, Gregoria Chemane, Helena Chemane, Brimildo Novela, Meraldino Chemane e Erasmo Bras pelo apoio moral que foi prestado ao longo de todos os anos da minha formação.

Ao meu amigo helder do Rosário Manhiça pelo apoio prestado.

**Lista de figuras**

**Figura 2.2.1.** Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.....5

**Figura 2.2.2 a ).** Brisa Marítima.....6

**Figura 2.2.2 b).** Brisa terrestre.....6

**Figura 2.2.3. a).** Brisa de vale.....7

**Figura 2.2.3. b ).** Brisa de montanha.....7

**Figura 2.3.1.**Comportamento do vento sob a influência das características do terreno.....8

**Figura 2.4.1.** Direcção e sentido da força de gradiente de pressão, numa carta isobárica.....9

**Figura 2.4.2.** Uma partícula de ar ABCD com  $1\text{ cm}^2$  de secção entre as isóbaras  $p$  e  $p+\Delta$ .....10

**Figura 2.4.3.** Efeito de coriolis em diferentes locais e sua orientação.....11

**Figura 2.4.4.** Efeito da distancia entre as isóbaras sobre a velocidade do vento,  $(v_1 > v_2)$ .....12

**Figura 2.4.5.**efeito da força de atrito.....14

**Figura 2.5.1.a).** Função de Weibull ( $c=8\text{m/s}$ ; e  $k_1=2$ ;  $k_2=2.5$ ;  $k_3=3$ ).....16

**Figura 2.5.2.b).** Função de Weibull ( $k=2.3$  e  $c_1=7\text{m/s}$ ;  $c_2=8\text{m/s}$ ;  $c_3=9\text{m/s}$ ).....16

**Figura 2.6.1.** Anemómetro comercial usadas em estações meteorológicas para a determinação da velocidade do vento.....18

**Figura 2.6.2.**biruta ou manga de vento.....19

**Figura 2.7.1.** fluxo de ar através de uma área transversal  $A$ .....20

**Figura 2.7.2.**perdas de velocidade de vento na passagem por um conjunto de pás.....21

**Figura 2.7.3.** distribuição de  $c_p$  em função de  $V_3/V_1$ .....23

### Resumo

A questão ambiental hoje, exige de todos nós uma atenção especial, devido aos profundos impactos causados ao meio ambiente, em decorrência das diversas actividades humanas. A procura por formas alternativas de energia, cujo impacto ao meio ambiente seja mínimo, é um exemplo de medida que cumpre com essa exigência. Neste trabalho faz-se uma análise da energia eólica, fazendo uma abordagem geral sobre os recursos de energia eólica, isto é, O trabalho apresenta a descrição dos aspectos dinâmicos dos ventos e circulação atmosférica na terra, incluindo a descrição dos factores que influenciam a velocidade e direcção dos ventos. São discutidos também aspectos como a energia contida no vento e aspectos estatísticos do vento sob forma de distribuições de Weibull e Rayleigh.

**ÍNDICE**

Declaração de honra.....	i
Agradecimentos.....	ii
Lista de figuras .....	iii
Resumo.....	iv
Cap. I- Introdução.....	2
1.1-Contexto de estudo.....	2
1.2- Justificativa do tema.....	2
1.3- Objectivo geral .....	2
1.3.1-Objectivos específicos .....	2
1.4-perguntas de pesquisa.....	3
Capitulo II- Revisão bibliográfica .....	4
2.1-Energia eólica .....	4
2.2-regimes de vento e variação da velocidade com a altura .....	4
2.2.1- Mecanismos de geração dos ventos.....	4
2.3- Factores que influenciam o regime dos ventos.....	7
2.4-Forças que se exercem sobre o ar em movimento .....	8
2.4.1-Força de gradiente de pressão .....	8
2.4.2-Força de coriolis .....	10
2.4.3-Força de atrito.....	13
2.5-Distribuição de Weibull .....	15
2.6-Instrumentos de medição do vento .....	17
2.6.1-Anemómetro.....	17
2.6.2-Biruta .....	18
2.7- Calculo do potencial eólico e coeficiente de potência .....	19
2.7.1- Energia e potência extraída do vento.....	19
2.8-Vantagens e desvantagens .....	23
2.9-Aplicações do recurso eólico .....	25
Capitulo III- Metodologia. ....	25
Capitulo IV- Conclusões e recomendações.....	26
4.1Conclusão.....	26
4.2-Recomendações .....	26
Capitulo v- Referencias bibliográficas .....	27

## **Cap. I- Introdução**

### **1.1-Contexto de estudo**

O aproveitamento da energia eólica através de moinhos de vento, foi uma prática bastante usada na antiguidade tanto na persia como na china, objectivando não só a irrigação mas também a moagem de grãos.

No seculo XIX, com a descoberta da máquina a vapor, os moinhos de vento que até então tinham seu uso generalizado passaram a ter aplicações mais reduzidas proveniente da chegada de uma tecnologia de característica mais consistente, pois não dependia dos ventos.

O surgimento dos motores a combustão no seculo XX, se por um lado proporcionou a erradicação dos moinhos de vento do cenário das tecnologias de aproveitamento energético. Por outro introduziu o petróleo, uma fonte finita de energia, como vector energético de bastante significação no sector produtivo.

Na decada 70 o mundo viveu os efeitos da crise do petróleo, o que serviu para alertar da necessidade da busca de outras alternativas energéticas, face a vulnerabilidade do ponto de vista fisico e económico da dependencia do seu uso.

A energia eólica, portanto, desponta como uma das modalidades de energia de aproveitamento factível no actual contexto energético mundial, uma vez que se trata de um tipo de energia não poluente, abundante, e em alguns paises ja apresenta viabilidade tecnica e económica.

### **1.2- Justificativa do tema**

Foi escolhido este tema recursos de energia eólica na perspectiva de despertar a opinião pública para o interesse no estudo e aproveitamento deste recurso energético.

### **1.3- Objectivo geral**

Tecer algumas considerações teóricas sobre os recursos de energia eólica.

#### **1.3.1-Objectivos específicos**

Perceber o regime dos ventos e variação da velocidade com a altura.

Conhecer alguns instrumentos de medição de vento.

Descrever os factores que influenciam na velocidade do vento

Calcular o potencial eólico e a energia máxima do vento que pode ser extraída por uma turbina para fins de aproveitamento da energia eólica.

**1.4-perguntas de pesquisa**

Qual é a causa do surgimento dos ventos, como é que a velocidade varia com a altura?

Existem vários instrumentos de medição do vento, qual é o mais usado?

Qual é a energia máxima que pode ser extraída do vento por uma turbina eólica?



## Capítulo II- Revisão bibliográfica

### 2.1-Energia eólica

Denomina-se energia eólica a energia cinética contida nas massas de ar em movimento (vento). É uma abundante fonte de energia, renovável, limpa e disponível em todos os lugares. Seu aproveitamento ocorre por meio da conversão da energia cinética de translação em energia cinética de rotação, com o emprego de turbinas eólicas, também denominadas aerogeradores, para a geração de electricidade, ou cata-ventos (e moinhos), para trabalhos mecânicos como bombeamento de água.

Assim como a energia hidráulica, a energia eólica é utilizada há milhares de anos com as mesmas finalidades, a saber: bombeamento de água, moagem de grãos e outras aplicações que envolvem energia mecânica. Para a geração de electricidade, as primeiras tentativas surgiram no final do século XIX, mas somente um século depois, com a crise internacional do petróleo (década de 1970), é que houve interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e aplicação de equipamentos em escala comercial.

### 2.2-regimes de vento e variação da velocidade com a altura

#### 2.2.1- Mecanismos de Geração dos Ventos

Os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera, por isso a energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol. A orientação dos raios solares, os movimentos da Terra e outros factores é que provocam a não uniformidade no aquecimento da atmosfera (CEPEL, 2001). O deslocamento de massas de ar determina a formação dos ventos. Esse mecanismo de formação de ventos está apresentado na fig. 2.2.1

Em alguns locais do globo terrestre os mecanismos que produzem o vento estão sempre presentes consequentemente os ventos jamais cessam de soprar. Esses ventos São os chamados ventos planetários ou constantes, e podem ser classificados em:

- Alísios: são originados pelo movimento das massas de ar quente dos trópicos para o Equador, em baixas altitudes.

- Contra-Alísios: são ventos secos responsáveis pelas calmarias tropicais secas. Sopram do Equador para os pólos, em altitudes elevadas.
- Ventos do Oeste: são ventos que sopram dos trópicos para os pólos.
- Polares: são ventos frios que sopram dos pólos para as zonas temperadas.

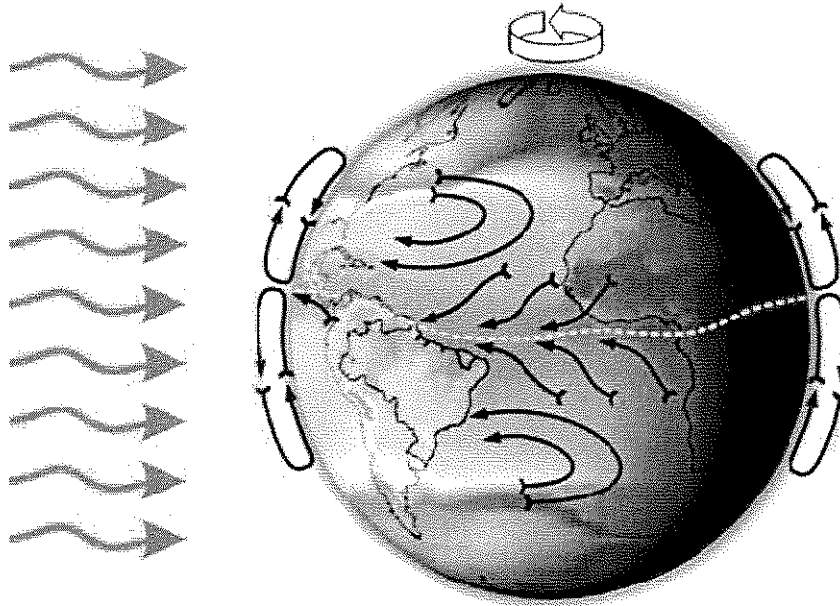


Figura 2.2.1- Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.

Fonte: CEPEL, 2001

Tendo em vista que o eixo da Terra está inclinado de  $23,5^\circ$  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 (CEPEL, 2001). Daqui surgem os ventos periódicos ou continentais que são as monções e as brisas. As monções são ventos periódicos que mudam de direcção semestralmente aproximadamente. Em geral, as monções sopram em determinada direcção em uma estação do ano e em sentido contrário em outra estação.

Em função das diferentes capacidades de reflectir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes á cada tipo de superfície (tais como mares e continentes), surgem as brisas que caracterizam-se por serem ventos periódicos que sopram do mar para o continente e vice-versa. No período diurno, devido à maior capacidade da terra de reflectir os raios

solares, a temperatura do ar aumenta e, como consequência, forma-se uma corrente de ar que sopra do mar para a terra (brisa marítima) fig. 3.1.2.a). À noite, a temperatura da terra cai mais rapidamente do que a temperatura da água e, assim, ocorre a brisa terrestre que sopra da terra para o mar fig. 3.1.2.b). Normalmente, a intensidade da brisa terrestre é menor do que a da brisa marítima devido à menor diferença de temperatura que ocorre no período noturno.

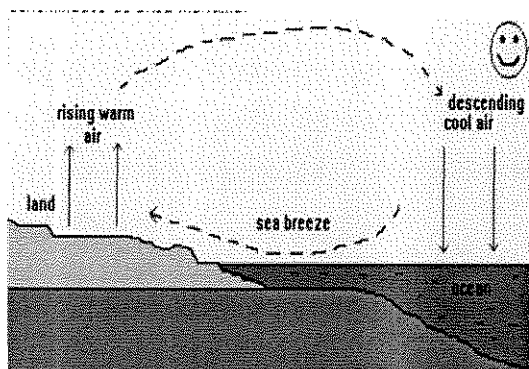


Fig.2.2.2 a) Brisa Marítima

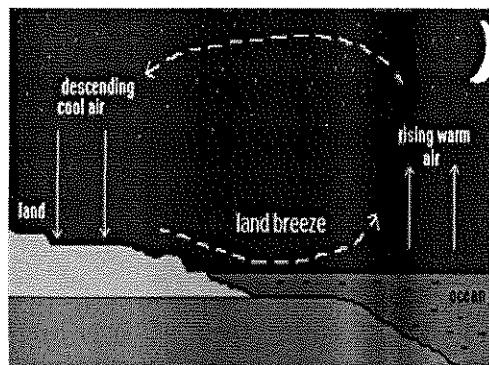


Fig.2.2.2 b) Brisa Terrestre

Fonte: <http://www.ace.mmu.ac.uk/eae/>

Sobreposto ao sistema de geração dos ventos descrito acima, encontram-se os ventos locais, que são originados por outros mecanismos mais específicos. São ventos que sopram em determinadas regiões e são resultantes das condições locais, que os tornam bastante individualizados.

A mais conhecida manifestação local dos ventos é observada nos vales e montanhas. Durante o dia, o ar quente nas encostas da montanha se eleva e o ar mais frio desce sobre o vale para substituir o ar que subiu (fig.2.2.3 a). No período noturno, a direção em que sopram os ventos é novamente revertida, e o ar frio das montanhas desce e se acumula nos vales (fig.2.2.3.b).

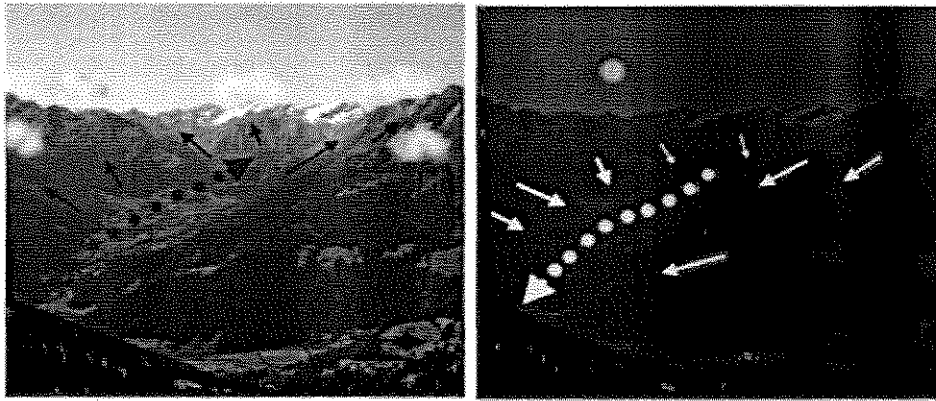


Fig.2.2.3.a) Brisa de Vale

fig.2.2.3.b) Brisa de Montanha

Fonte: [www.atmosphere.mpg.de/.../2\\_circula\\_\\_0\\_Local\\_3v5.html](http://www.atmosphere.mpg.de/.../2_circula__0_Local_3v5.html)

### 2.3- Factores que influenciam o regime dos ventos

O comportamento do vento é influenciado pela variação de velocidade do mesmo ao longo do tempo. O relevo de uma certa região influencia de maneira significativa no comportamento dos ventos uma vez que, numa área, podem ocorrer diferenças de velocidade, ocasionando a diminuição ou aumento na velocidade do vento. A velocidade também varia seu comportamento com a altura, Além das variações do relevo e da rugosidade do solo. Tomando em conta que a velocidade do vento pode variar de forma significativa em distâncias relativamente pequenas (algumas centenas de metros), deve-se tomar em conta todos os parâmetros regionais que influenciam nas condições do vento para avaliar o local no qual se deseja instalar turbinas eólicas.

Os principais factores que influenciam no regime dos ventos são:

- A variação da velocidade com a altura;
- A rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar.

As informações necessárias para o levantamento das condições regionais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos e de uma visita ao local de interesse para avaliar e modelar a rugosidade e os obstáculos. O uso de imagens aéreas e dados de satélite também contribuem para uma análise mais acurada. O comportam dos ventos quando

estão sob a influência das características da superfície do solo está mostrado na fig 2.3.1.

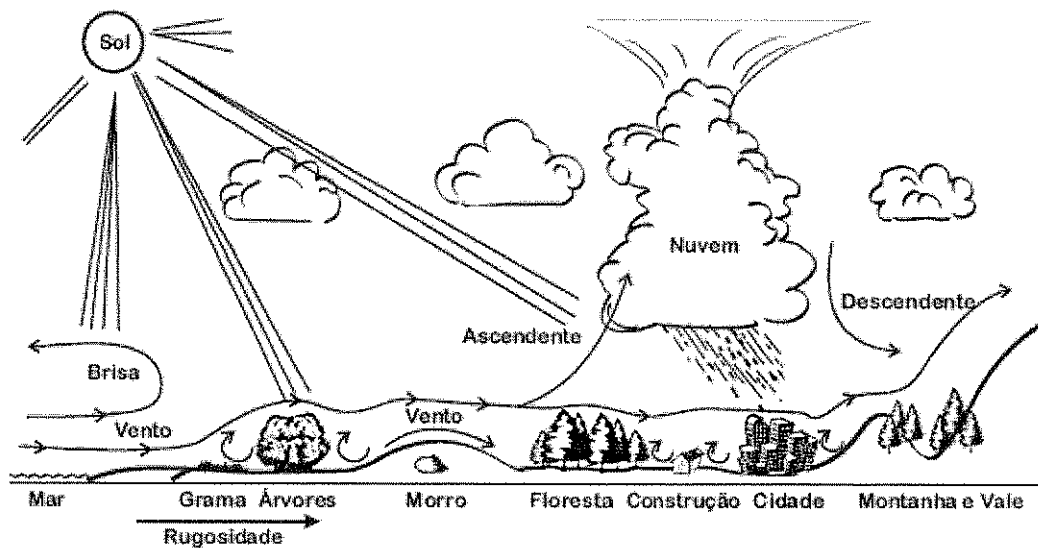


Figura 2.3.1 - Comportamento do vento sob a influência das características do terreno  
 Fonte: CEPTEL, 2001

## 2.4-Forças que se exercem sobre o ar em movimento

As três forças determinantes da velocidade e direcção do vento horizontal são:

A força do gradiente de pressão, a força de Coriolis e a força de atrito.

Em resumo, o vento surge basicamente pela acção da força do gradiente de pressão. Apenas após iniciado movimento, as forças de atrito e de Coriolis passam a actuar, mas somente para modificar o movimento, e não para produzi-lo, sendo o vento controlado Pela combinação dessas forças.

### 2.4.1-Força de gradiente de pressão

Uma partícula de ar fica sujeita a uma força chamada força de gradiente de pressão que tende a movela das altas para as baixas pressões Devido a desigual distribuição da pressão atmosférica.

O decrescimo da pressão atmosférica por unidade de distancia, medido normalmente as isóbaras e na direcção em que a pressão decresce com mais rapidez é definida como gradiente horizontal da pressão, que é:

- Normal as isóbaras
- Dirigido das altas para as baixas pressões e inversamente proporcional a distancia entre as isobaras.

Um centro de altas pressões A e o outro de baixas pressões B, para o hemisfério sul, é representado numa carta isobárica conforme a figura 2.4.1, são indicadas duas rectas que fazem um ângulo recto com as isóbaras conforme a definição que mostram que a partir do centro de altas pressões a pressão diminui progressivamente para qualquer direcção, dirigido, como se ve, das altas para as baixas pressões. isobaras muito separadas indicam um gradiente fraco, ocasionando ventos igualmente fracos. Isóbaras proximas umas das outras indicam que o gradiente é forte, variando rapidamente a pressão com as distancias relativamente curtas causando ventos fortes.

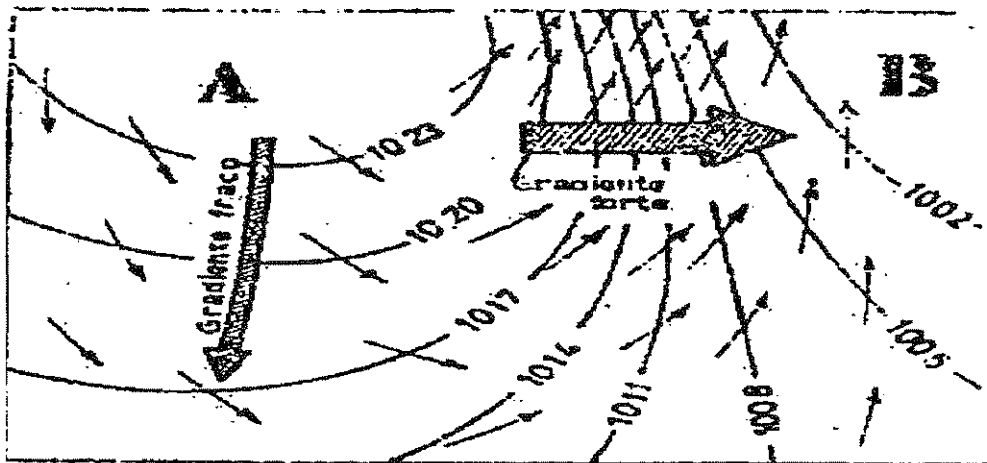


Fig.2.4.1-Direção e sentido da força de gradiente de pressão, numa carta isobarica

Fonte: Cunha, 1972

Para determinar a expressão para força de gradiente de pressão consideremos uma partícula de ar ABCD figura 2.4.2 com  $1\text{cm}^2$  de secção entre as isóbaras  $p$  e  $p+\Delta p$ .

A expressão é uma força na unidade de área, a diferença de pressão  $\Delta p$  representa a força actuando sobre a partícula e dirigida da pressão mais alta para a mais baixa. Se representarmos a distância entre as isóbaras, medida segundo a normal, por  $\Delta d$ , a força de gradiente de pressão por unidade de comprimento será:

$$F_p = -\frac{\Delta P}{\rho \Delta d} \quad (2.4.1)$$

Que é, inversamente proporcional a distância entre isóbaras e directamente proporcional a diferença de pressão.

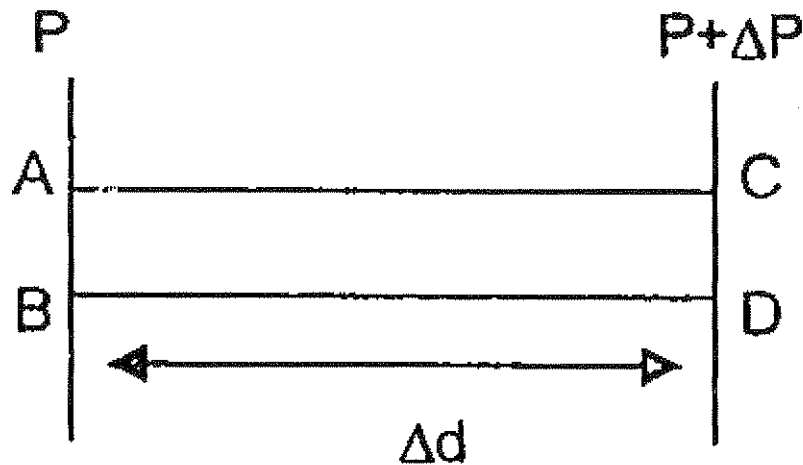


Fig 2.4.2-Uma partícula de ar ABCD com 1cm<sup>2</sup> de secção entre as isóbaras p e p+Δp.

Fonte: Cunha, 1972

#### 2.4.2-Força de coriolis

Se a terra não girasse sobre o seu 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 do ar em movimento, efeito que é conhecido como força de coriolis. Esta força actuando sobre as partículas do ar logo que estas iniciam o movimento por acção do gradiente de pressão altera-lhes a trajetória, desviando-as daquela que as partículas seguiriam por efeito da força de gradiente (Tabela, 2002).

A acção da força de coriolis pode ser expressa pela lei de Ferrel: qualquer objecto ou fluido movendo-se horizontalmente tende a desviar-se para a direita da sua trajetória no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul, independentemente da direcção do seu movimento.

A força de coriolis 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; e (b) o movimento do corpo em relação a rotação da

terra. Devemos portanto ter em atenção que o vento observado representa sempre o movimento do ar relativo a rotação da terra.

O efeito da rotação da terra sobre a direcção do vento é expresso pela expressão:

$$D = 2\rho v\Omega \sin\varphi \quad (2.4.2)$$

D-é a força ou aceleração de coriolis por unidade de volume

V- é a velocidade do vento geostrófico

$\Omega$ - é a velocidade angular da terra(2 $\pi$  em 24 horas)

$\varphi$ - é a latitude

$\rho$ - é a densidade do meio

pela análise da fórmula acima, chegamos a conclusão de que, a força de coriolis é maxima nos polos( $\sin\varphi=1$ ) e minimo no equador onde se anula( $\sin\varphi=0$ ).

Como consequencia desse facto, o ar é menos desviado nas baixas latitudes do que nas latitudes altas onde o vento sofre um desvio maior.

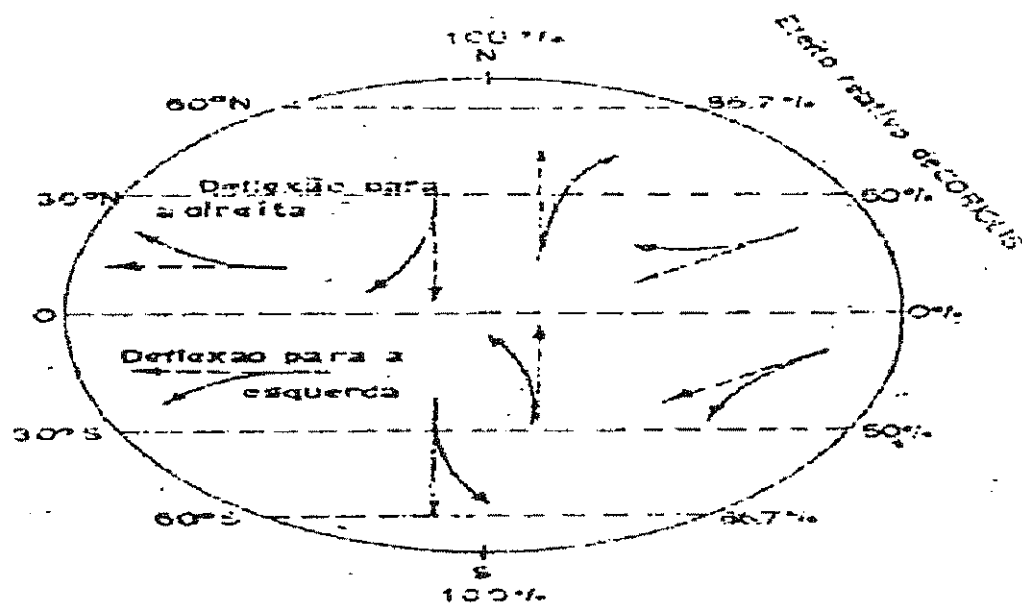


Fig.2.4.3-efeito de coriolis em diferentes locais e sua orientação

Fonte: Cunha, 1972



Os dois factos importantes da força de coriolis são, portanto os seguintes:

- a) O ar em movimento desvia-se para a esquerda no hemisfério sul e para a direita no hemisfério norte.
- b) Para um determinado lugar a velocidade do vento é afectada pela força de coriolis.

Assim, a velocidade do vento é determinada essencialmente pela inclinação barométrica, ou seja, pela variação horizontal da pressão atmosférica por unidade de distância, se bem que a densidade do ar, a latitude e o atrito influenciam em certa medida essa velocidade. Na atmosfera livre, o efeito de atrito da superfície do globo não se exerce, ou é muito reduzido, a direcção do vento é paralela as isobaras vento geostrofico e o ar pode desse modo ser encerrado como um fluxo que se desloca entre as isobaras da mesma maneira que a água corre num rio. Quando o rio é estreito o fluxo é rapido e quando é largo o fluxo é lento.(TAIELA, 2002)

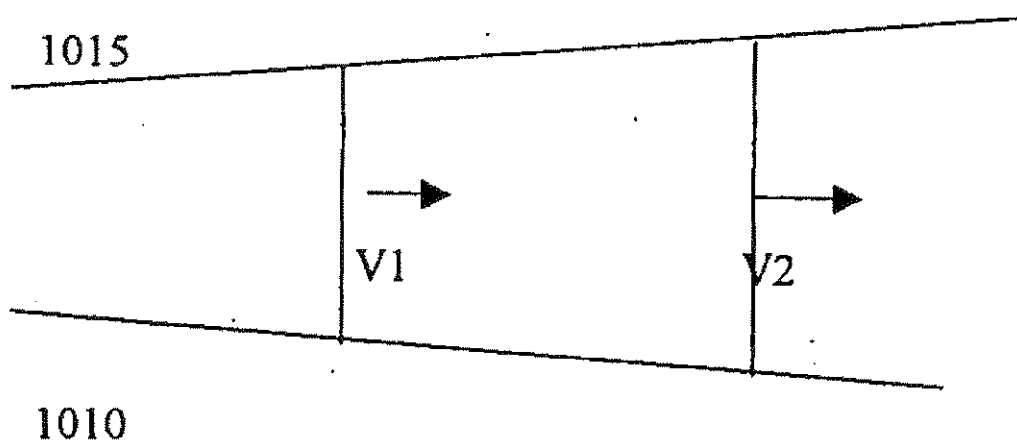


Fig.2.4.4-Efeito da distância entre as isóbaras sobre a velocidade do vento,( $V_1 > V_2$ )

Fonte: Cunha, 1972

Pode-se deste modo determinar a velocidade do vento pela distância entre as isóbaras, principalmente quando o vento é geostrofico.

Existem tabelas e escalas que permitem em função dessa distância e da latitude determinar directamente essa velocidade.

Em função da variação da força de coriolis com a latitude, aumentando, como se disse, do equador para os polos, a velocidade do vento para a mesma distância entre as isóbaras diminui no mesmo sentido. Assim, por exemplo, uma diferença de pressão de 2.5mb entre dois pontos situados a distância de 150km resulta uma velocidade do vento geostrófico de cerca de 60km/h para a latitude de 40°, 45km/h para a latitude de 60° e 38km/h para a latitude de 80°.

#### 2.4.3-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 velocidade como a direcção do vento. Com efeito, a força de atrito, actuando paralelamente, a direcção do vento mas em sentido oposto, faz diminuir a sua velocidade, destruindo o equilíbrio que se verifica no vento geostrofico entre as forças de gradiente de pressão e a força de coriolis. como esta última é proporcional a velocidade do vento e, por conseguinte, diminuída, tornando-se então predominante a força de gradiente de pressão.

Sendo assim, o ar é desviado para o centro das baixas pressões, como se vê pelo esquema da figura 2.4.5.

Em ambos os hemisférios, portanto, o ar converge para os centros de baixas pressões e diverge para os centros de altas pressões.

Tomando em consideração a força de atrito o angulo( $\alpha$ ) que a direcção do vento faz com o gradiente de pressão pode ser expressa pela expressão:

$$\operatorname{tg} \alpha = 2\Omega \operatorname{sen} \frac{\varphi}{k} \quad (2.4.3)$$

$\varphi$ - é a altitude do lugar

$\Omega$ -velocidade angular da terra

k-coeficiente de atrito

esta formula indica que quando  $(k)$  diminui  $(\alpha)$  aumenta. Se  $(k)$  é proximo de zero, como se verifica a superficie dos oceanos  $(\alpha)$  é aproximamente igual a  $90^\circ$ , isto é, sobre a superficie da água o vento se aproxima do vento geostrofico.

O coeficiente  $(k)$  pode ser obtido pela medição do ângulo que a direcção do vento observado a superficie faz com que a direcção do gradiente de pressão e, por consiguiente, a distribuição do vento a superficie permite-nos apreciar o efeito de atrito.

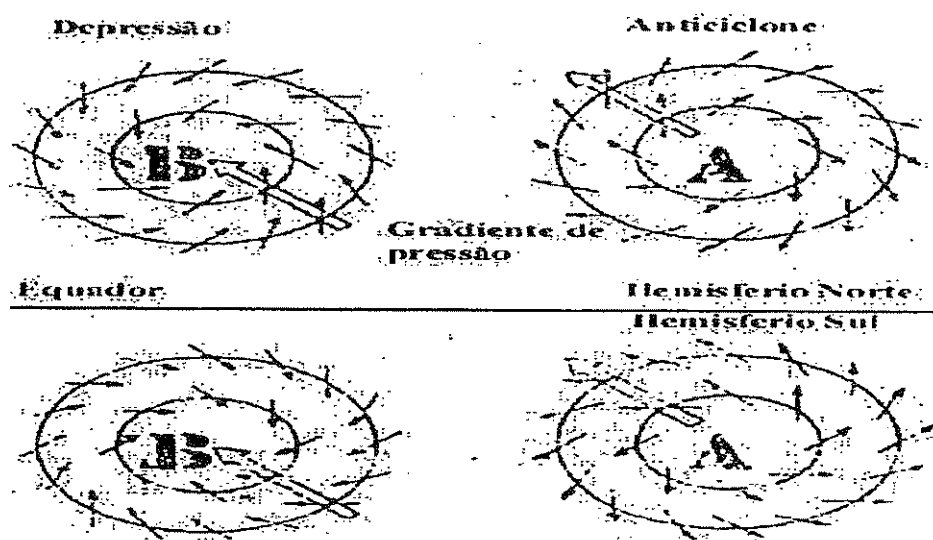


Fig.2.4.5-Efeito da força de atrito

Fonte: meteorologia geral e agricola 1º parte por F.Reis Cunha 1972

Atendendo ao facto do atrito sobre os oceanos ser menor que sobre os continentes podemos concluir que para um dado valor de gradiente de pressão os ventos são mais fortes e mais proximos do paralelismo com as isóbaras sobre os oceanos do que sobre os continentes. Sobre aqueles a direcção do vento, em geral, não ultrapassa  $20^\circ$  em relação a direção das isóbaras e o vento é aproximadamente  $2/3$  do vento do gradiente, e sobre os continentes o atrito depende do relevo do solo, variando o ângulo referido de  $25^\circ$  a  $40^\circ$  e sendo maior a diminuição da velocidade do vento.

O efeito de atrito diminui com a altitude e a cerca de 100m os seus efeitos são ja despreziveis. Acima dessa altitude os ventos sopram, portanto, paralelamente as isóbaras, isto é, são ventos geostrofos. Aquele nivel chama-se nivel de gradiente e a

camada da superfície do globo até esse nível denomina-se camada de atrito, dependendo da sua espessura, da velocidade do vento, estabilidade do ar, natureza do ar e do revestimento do solo etc.

### 2.5-Distribuição de Weibull

Os registos da densidade de probabilidade ganham importância se puderem ser descritos por expressões analíticas. Têm sido sugeridas várias distribuições probabilísticas para descrever o regime de ventos, mas a distribuição de Weibull é normalmente considerada como a mais adequada. A expressão matemática da função densidade de probabilidade de Weibull  $f(u)$  é:

$$f(\bar{u}) = \frac{k}{c} \left(\frac{\bar{u}}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left[\left(\frac{\bar{u}}{c}\right)^k\right]\right\} \quad (2.5.1)$$

Em que  $\bar{u}$  é a velocidade média do vento,  $c$  é um parâmetro de escala, com as dimensões de velocidade, e  $k$  é um parâmetro de forma, sem dimensões.

A velocidade média anual do vento  $u_{ma}$  calcula-se através de:

$$u_{ma} = \int_0^{\infty} \bar{u} f(\bar{u}) d\bar{u} \quad (2.5.2)$$

Na prática têm-se distribuições discretas da velocidade média do vento em classes de 1 m/s, pelo que a velocidade média anual se calcula, de forma aproximada, por:

$$u_{ma} = \sum_{u=0}^{\bar{u}_{max}} \bar{u} f(\bar{u}) \quad (2.5.3)$$

A função Gamma ( $\Gamma$ ) relaciona os parâmetros  $c$  e  $k$  da distribuição de Weibull com as características da velocidade do vento – média anual e variância, através das relações seguintes:

$$u_{ma} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2.5.4)$$

$$\sigma^2 = c^2 \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \right] \quad (2.5.5)$$

Relacionemos as características da velocidade do vento com os parâmetros  $c$  e  $k$  da função densidade de probabilidade de Weibull. Para o efeito traçamos a função de Weibull para a)  $c = 8$  m/s e  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 2,5$ ;  $k_3 = 3$ ;

b)  $k = 2,3$  e  $c_1 = 7$  m/s;  $c_2 = 8$  m/s;  $c_3 = 9$  m/s.

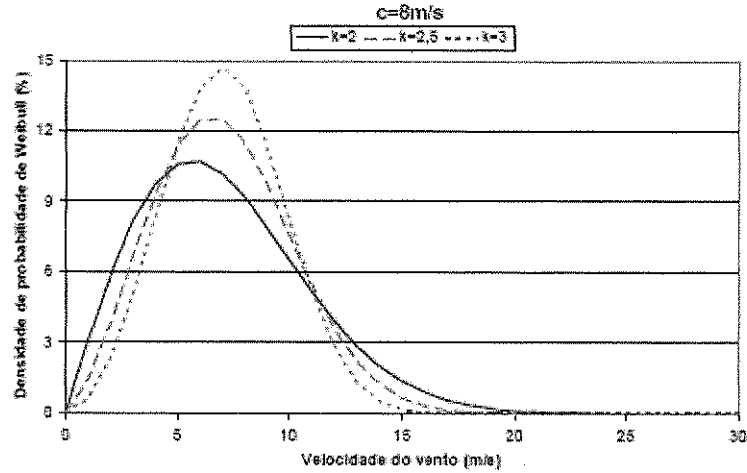


fig. 2.5.1.a). Função de Weibull ( $c = 8$  m/s e  $k_1 = 2$ ;  $k_2 = 2,5$ ;  $k_3 = 3$ )

Fonte: Castro, 2007

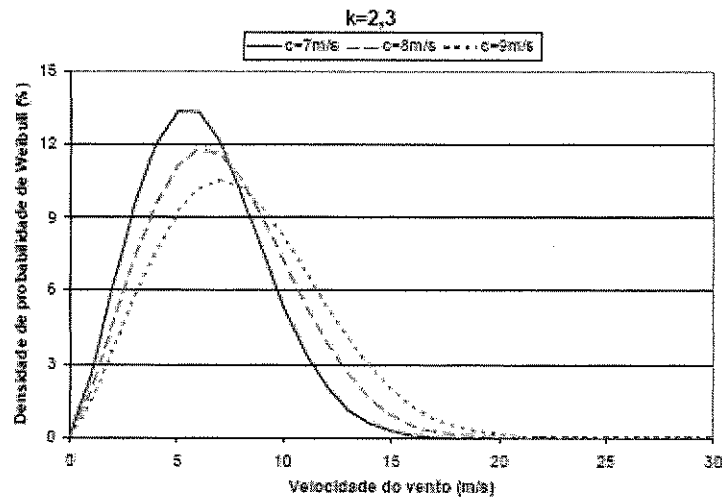


fig. 2.5.1.b). Função de Weibull ( $k = 2,3$  e  $c_1 = 7$  m/s;  $c_2 = 8$  m/s;  $c_3 = 9$  m/s)

Fonte: Castro, 2007

Para o cálculo dos parâmetros  $c$  e  $k$  usa-se a regressão linear.

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

Rayleigh:

$$f(\bar{u}) = \frac{\pi}{2} \frac{\bar{u}}{u_{ma}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{\bar{u}}{u_{ma}}\right)^2\right] \quad (2.5.6)$$

em que  $u_{ma}$  é a velocidade média anual.

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.

## 2.6-Instrumentos de medição do vento

### 2.6.1-Anemómetro

Um anemómetro consiste num instrumento para medir a velocidade do vento ou de outros fluidos em movimento.

Geralmente possui um cata-vento para indicar a direcção do vento. Este é constituído por uma bandeira bem equilibrada que gira em torno de uma haste vertical.

A bandeira tende a orientar-se ao longo das linhas de corrente do movimento do ar e os seus movimentos são transmitidos por meios mecânicos ou eléctricos a mostradores ou a registadores, que indicam a direcção do vento.

Quando dispõem de um dispositivo de registo, designa-se por anemógrafo.

Consoante o fundamento em que se baseia o funcionamento dos anemómetros, estes podem ser classificados em diversas categorias: anemómetros de rotação, anemómetros de veleta, anemómetros de tubo de pressão e anemómetros baseados no poder refrescante do ar em movimento.

Quando não se necessita de grande rigor, utiliza-se o anemómetro de veleta, o de mangas de ar ou bandeira (em torres). Para determinar a velocidade média do vento usa-se o anemómetro de conchas e para a determinação da velocidade instantânea, o anemómetro de tubo de repouso.

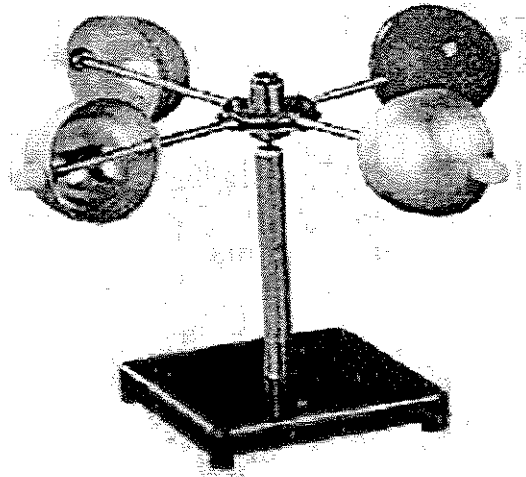


fig. 2.6.1 Anemómetro comercial usado em estações meteorológicas para a determinação da velocidade dos ventos.  
Fonte: Horbach, 2009

### 2.6.2-Biruta

A biruta (português brasileiro) ou manga de vento (português europeu) é um aparelho capaz de mostrar a direcção do vento. É constituído por um cone de tecido com duas aberturas, uma das quais é maior e acoplada a uma camisinha de metal. A biruta tem a forma de um coador de café, embora seja muito maior e mais longa. Este instrumento é muito usado em aeroportos, onde orienta a decolagem e a aterragem dos aviões. Essas manobras só podem ser feitas em sentido contrário ao vento, cujo sentido indica.

As birutas são desenvolvidas para fornecer a direcção visual de vento de superfície e as informações de velocidade de vento aos pilotos, quando em voo ou no solo, nos aeroportos ou heliportos.

É normalmente feita de lona ou algodão.

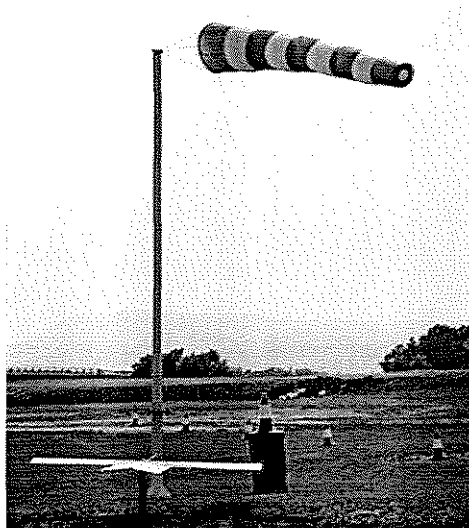


Fig.2.6.2-Biruta ou manga de vento

Fonte: [pt.wikipedia.org/wiki/Biruta](http://pt.wikipedia.org/wiki/Biruta)

## 2.7- Calculo do potencial eólico e coeficiente de potência

### 2.7.1- Energia e Potência Extraída do Vento

A energia cinética de uma massa de ar  $m$  em movimento a uma velocidade  $v$  é dada por:

$$E = mv^2/2 \quad (2.7.1)$$

Considerando a mesma massa de ar  $m$  em movimento a uma velocidade  $v$ , perpendicular a uma secção transversal de um cilindro imaginário fig.2.7.1, pode-se

demonstrar que a potência disponível no vento que passa pela secção  $A$ , transversal ao fluxo de ar, é dada por:

$$P = \rho Av^3/2 \quad (2.7.2)$$

Onde:

$P$  = potência do vento [W]

$\rho$  = massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$A$  = área da secção transversal [m<sup>2</sup>]

$v$  = velocidade do vento [m/s]



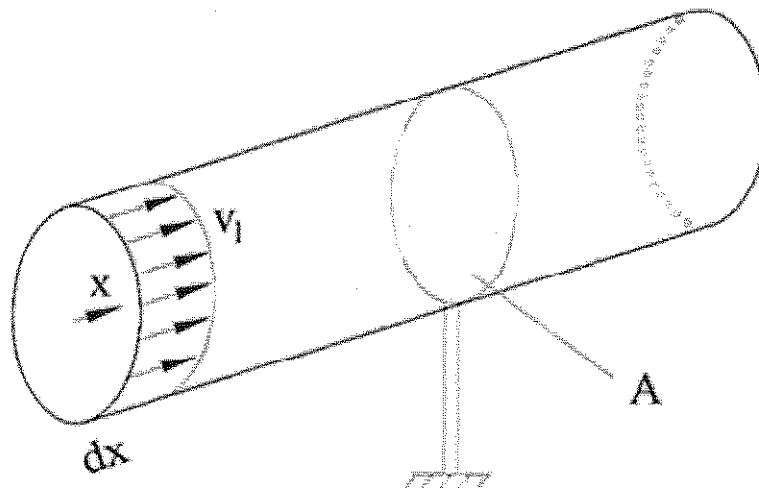


Figura 2.7.1 - Fluxo de ar através de uma área transversal A

Fonte: Montezano, 2008

A expressão 6.2 também pode ser escrita por unidade de área, definindo, desta forma, a densidade de potência DP, ou fluxo de potência:

$$DP = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.7.3)$$

Ao reduzir a velocidade do deslocamento da massa de ar, a energia cinética do vento é convertida em energia mecânica através da rotação das pás. A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão de energia eléctrica. Para levar em conta esta característica física, é introduzido um índice denominado coeficiente de potência  $c_p$ , que pode ser definido como a fracção da potência eólica disponível que é extraída pelas pás do rotor.

Para determinar o valor máximo desta parcela de energia extraída do vento ( $c_p$  máximo), o físico alemão Albert Betz considerou um conjunto de pás em um tubo onde  $v_1$  representa a velocidade do vento na região anterior às pás,  $v_2$  a velocidade do vento no nível das pás e  $v_3$  a velocidade no vento após deixar as pás, conforme apresentado na figura 2.7.2.

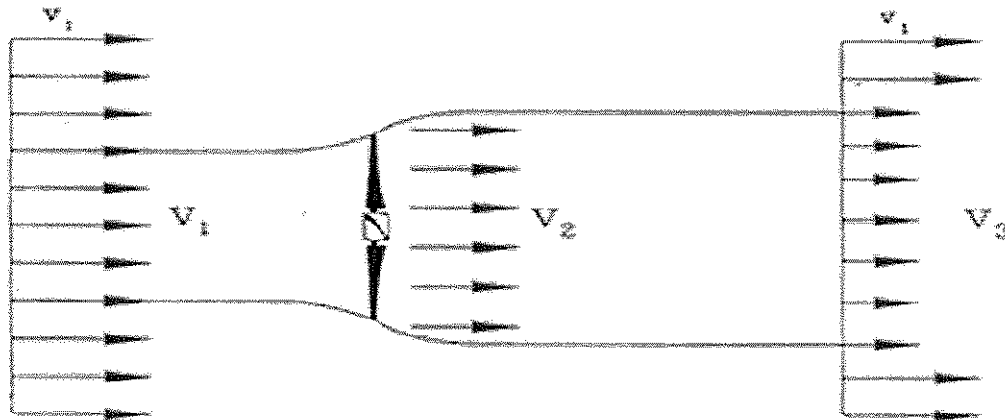


Figura 2.7.2 – Perdas de velocidade do vento na passagem por um conjunto de pás.

Fonte: Montezano, 2008

Como na figura 2.7.2, Betz assume um deslocamento homogêneo do fluxo de ar a uma velocidade  $v_1$  que é retardada pelo conjunto de pás, assumindo uma velocidade  $v_3$  a jusante das pás. Pela lei da continuidade, temos que:

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \rho v_3 A_3 \quad (2.7.4)$$

Como a redução da pressão do ar é mínima, a densidade do ar pode ser considerada constante. A energia cinética extraída pelo aerogerador é a diferença entre a energia cinética a montante e a energia cinética a jusante do conjunto de pás:

$$E_{ex} = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.7.5)$$

A potência extraída do vento por sua vez é dada por:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_3^2) \quad (2.7.6)$$

Neste ponto é necessário fazer duas considerações extremas sobre a relação entre as velocidades  $v_1$  e  $v_3$ :

A velocidade do vento não é alterada ( $v_1 = v_3$ ) – Neste caso nenhuma potência é extraída;

A velocidade do vento é reduzida a valor zero ( $v_3 = 0$ ) – Neste caso o fluxo de massa de ar é zero, o que significa também que nenhuma potência seja retirada.

A partir dessas duas considerações extremas, a velocidade referente ao máximo de potência extraída é um valor entre  $v_1$  e  $v_3$ . Este valor pode ser calculado se a velocidade no rotor  $v_2$  é conhecida. A massa de ar é dada por:

$$\dot{m} = \rho A v_2 \quad (2.7.7)$$

Pelo teorema de Rankine-Froude, pode-se assumir que a relação entre as velocidades  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  é dada por:

$$v_2 = \frac{v_1 + v_3}{2} \quad (2.7.8)$$

Se a massa de ar apresentada na equação 6.7 e a velocidade  $v_2$

apresentada na equação 6.8 forem inseridas na mesma equação 5.6, tem-se:

$$\dot{E}_{ex} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.7.9)$$

Onde:

$$\text{Potência do vento} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$\text{Coeficiente de Potência } C_p = \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{v_3}{v_1} \right] \left[ 1 - \left( \frac{v_3}{v_1} \right)^2 \right] \right\}$$

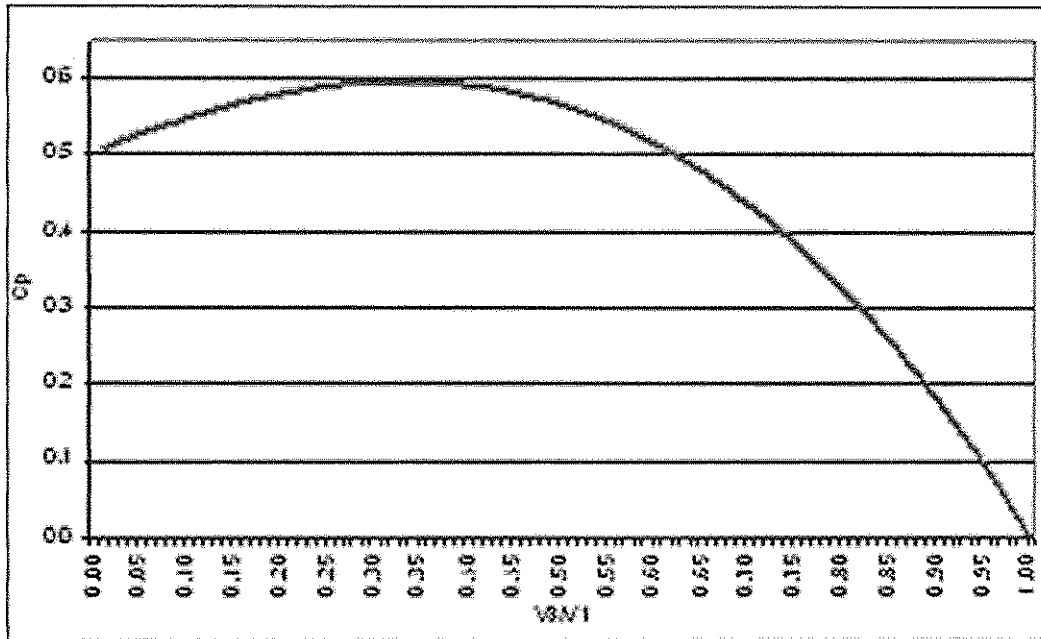


Figura 2.7.3 – Distribuição de  $C_p$  em função de  $v_3/v_1$

Fonte: Montezano, 2008

Ao considerar o coeficiente de potência  $C_p$  em função de  $v_3/v_1$  temos que:

$$C_{P_{\text{Betz}}} = \frac{16}{27} = 0.59$$

onde  $v_3/v_1 = 1/3$ .

## 2.8-Vantagens e desvantagens

As principais vantagens da Energia Eólica são as seguintes:

- É inesgotável;
- Não emite gases poluentes nem geram resíduos;
- Diminui a emissão de gases de efeito de estufa.

- Os parques eólicos são compatíveis com outros usos e utilizações do terreno como a agricultura e a criação de gado;
- Criação de emprego;
- Geração de investimento em zonas desfavorecidas;
- Reduz a elevada dependência energética do exterior, nomeadamente a dependência em combustíveis fósseis;
- Poupança devido à menor aquisição de direitos de emissão de CO<sup>2</sup> por cumprir o protocolo de Quioto e directivas comunitárias e menores penalizações por não cumprir;
- É uma das fontes mais baratas de energia podendo competir em termos de rentabilidade com as fontes de energia tradicionais.
- Os aerogeradores não necessitam de abastecimento de combustível e requerem escassa manutenção, uma vez que só se procede à sua revisão em cada seis meses.
- Excelente rentabilidade do investimento. Em menos de seis meses, o aerogerador recupera a energia gasta com o seu fabrico, instalação e manutenção.

**Principais Desvantagens da energia eólica:**

- A intermitência, ou seja, nem sempre o vento sopra quando a electricidade é necessária, tornando difícil a integração da sua produção no programa de exploração;
- Provoca um impacto visual considerável, principalmente para os moradores em redor, a instalação dos parques eólicos gera uma grande modificação da paisagem;
- Impacto sobre as aves do local: principalmente pelo choque destas nas pás, efeitos desconhecidos sobre a modificação de seus comportamentos habituais de migração;

### **2.9- Aplicações do recurso eólico**

A energia eólica pode ser utilizada através de aerogeradores para geração de electricidade como também por meio de cata-ventos para produção de energia mecânica.

A geração eléctrica a partir de aerogeradores, tem aplicação importante no accionamento de aparelhos eléctricos e na iluminação de comunidades que fiquem distantes dos centros de distribuição de energia eléctrica, já a conversão da energia eólica via cata-vento, produz energia mecânica necessária para bombeamento de água, moagem de grãos, irrigação. etc.

### **Capitulo III- Metodologia.**

O trabalho foi realizado com base em pesquisa bibliográfica.

## Capítulo IV- conclusões e recomendações

### 4.1 Conclusão

Os ventos surgem devido ao aquecimento diferenciado da atmosfera, com o aumento da altura a velocidade do vento aumenta devido a não rugosidade da superfície e a diminuição dos obstáculos, para fins de exploração de energia eólica as turbinas podem ser colocadas nas alturas que variam de 5 até 100 metros de acordo com os objectivos que se pretendem alcançar. O instrumento mais usado para a medição do vento é o anemómetro, o anemómetro apresentado neste trabalho funciona com base no princípio de Faraday.

A potência disponível no vento não pode ser totalmente aproveitada pelo aerogerador na conversão da energia eléctrica, o físico Albert Betz mostrou que a fracção de potência eólica disponível que é extraída pelas pás de uma turbina é 0.59.

### 4.2- Recomendações

Devemos todos despertar e interessarmos pelas energias renováveis visto que são recursos inesgotáveis diferentemente daqueles produzidos por fontes não renováveis.

A energia eólica em particular é uma energia limpa, é mais um motivo para nós moçambicanos tentarmos pelo menos numa primeira fase instalar pequenos parques eólicos nas zonas suburbanas onde dificilmente conseguimos fazer chegar a rede eléctrica convencional.

### Capítulo v- Referencias bibliográficas

1. Castro, R. M.G.(2007). *Energias Renováveis e Produção Descentralizada. INTRODUÇÃO À ENERGIA EÓLICA*, 3ª edição. disponível em:  
<https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/106889/1/-ed3.pdf>.
2. CEPEL, 2001. *Atlas do Potencial Eólico Brasileiro*. ed. CEPEL, Rio de Janeiro, RJ.
3. Cunha, F.R (1972). *Meteorologia geral e agrícola 1ª parte*.
4. Da silva, E. P.(s.d). *Energia eólica considerações teóricas e aplicações práticas*
5. Horbach, C.; Ribeiro, E. (2009). *Anemómetro por deflexão*. Porto Alegre.
6. Martins, F.R; Guarnieri R.A; Pereira, E.B (2008). *O aproveitamento da energia eólica*.
7. Montezano, B.Ferreira. C.(2008). *Energia eólica princípios e tecnologia*
8. Pavinatto, E.F.( 2005). *Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede eléctrica*.  
Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Eléctrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
9. Raiambal, K.; Chellamuth, C., 2002. *Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Electric Generating System*, In: *Proceedings of IEEE TENCON'02*
10. Taiela, A. M.( 2002). *Estudo do comportamento da energia eólica na região da Cidade de Maputo*. Trabalho de licenciatura supervisionado por Prof. Doutor Cuanba
11. Twidell, J.; Weir T. (1986). *Renewable Energy Resources*.