

# PME 5237

# FUNDAMENTOS DE ENERGIAS

# RENOVÁVEIS

# ENERGIA EÓLICA

PARTE 2

O VENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS

ESTIMATIVA DA ENERGIA FORNECIDA POR UMA

TURBINA

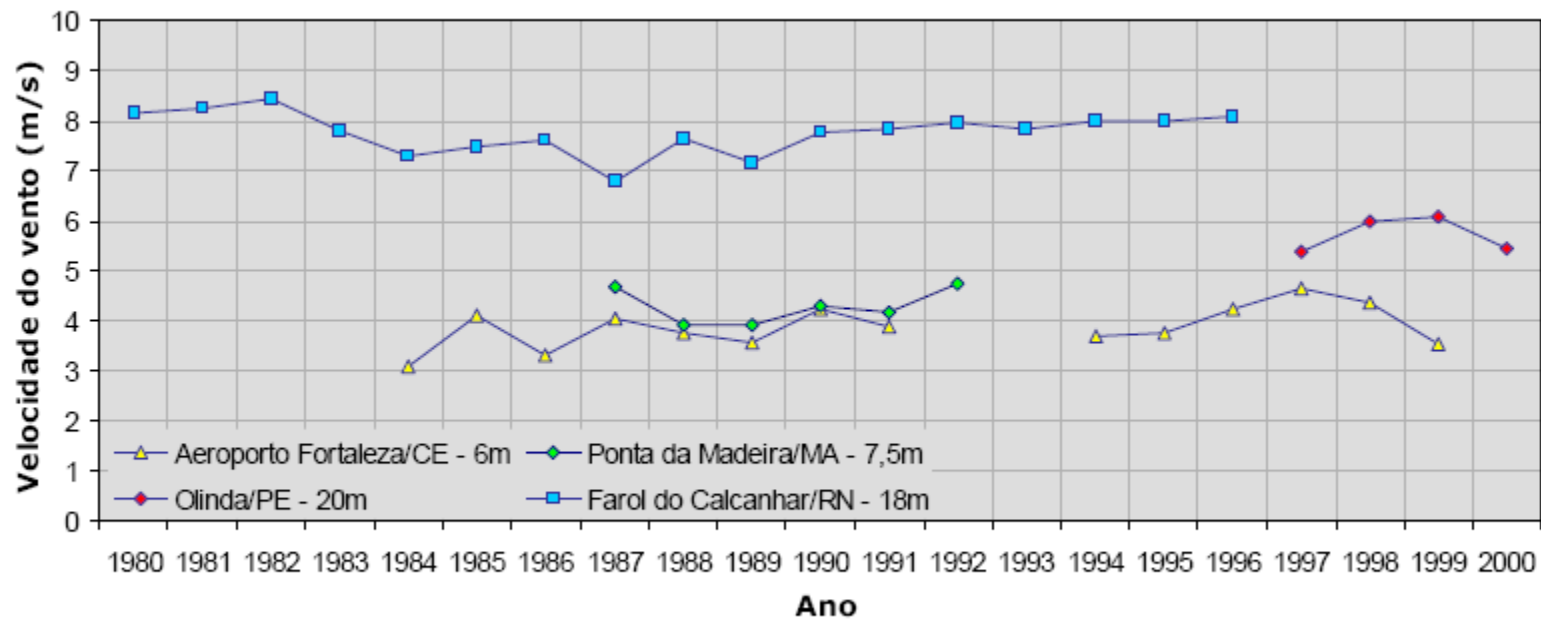
Prof. Demetrio Zachariadis

# **O VENTO E SUAS CARACTERÍSTICAS**

## Escalas temporais

### Variações lentas

- Variações inter-anuais
- Variações sazonais



Variação interanual da velocidade média.

# Importância das medições de longo prazo

Ano	Produção de energia relativa a média dos anos 1993-1998	
1993	103.0%	(3% acima da referência)
1994	105.9%	
1995	102.1%	
1996	90.4%	(9.6 % abaixo da referência)
1997	93.8%	
1998	105.0%	
1993-1998	100.0%	

Referência: média dos 6 anos (1993 a 1998)

Medições na torre de 130 m de altura do DEWI em Wilhelmshaven

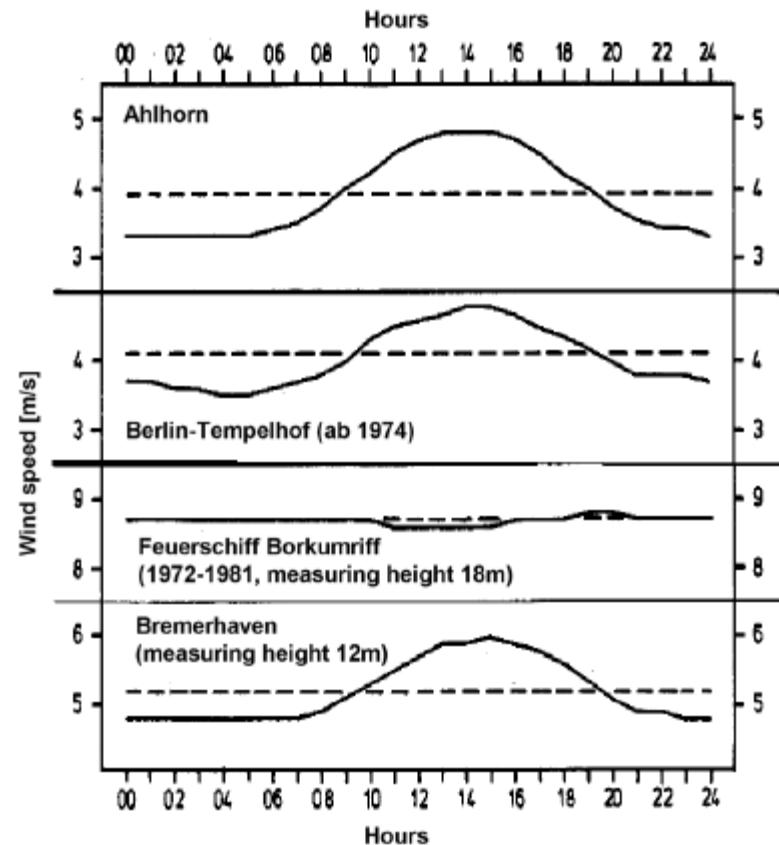
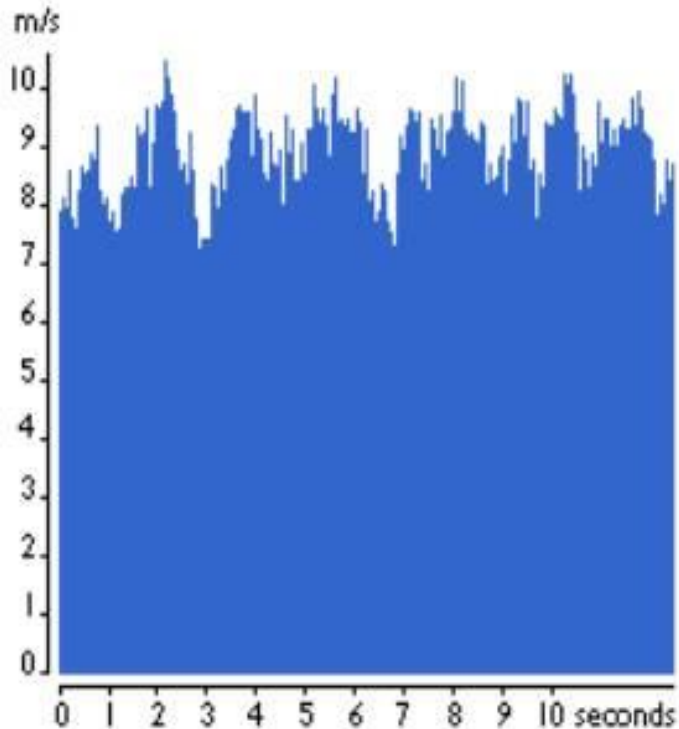


**Recomendável medições por períodos de 05 a 10 anos**

## Escalas temporais

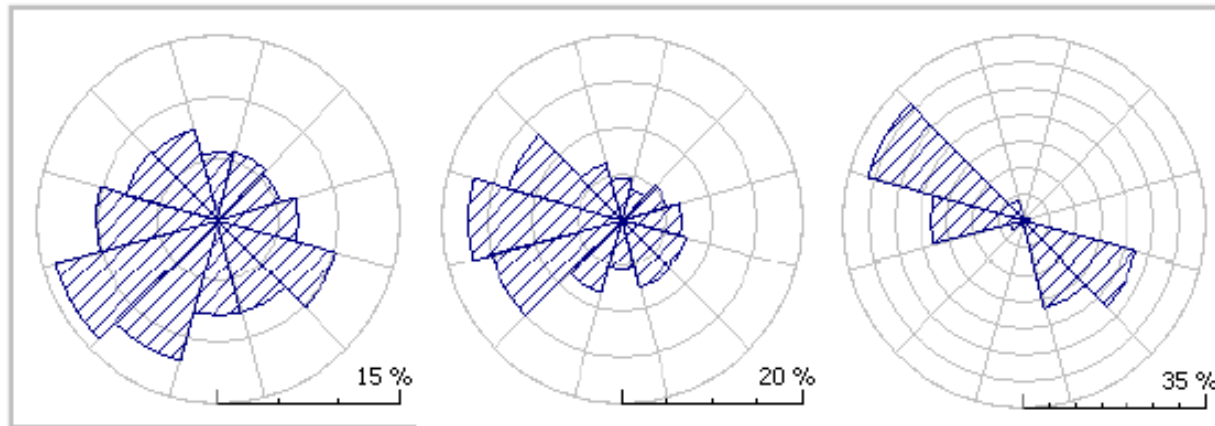
- Variações diárias
- Variações de curta duração

## Variações rápidas (escala “mecânica”)



# Variação na direção dos ventos

**Rosa do ventos** : Diagrama que mostra a distribuição temporal da direção dos ventos Normalmente utilizado para representar dados anuais, sazonais ou mensais.



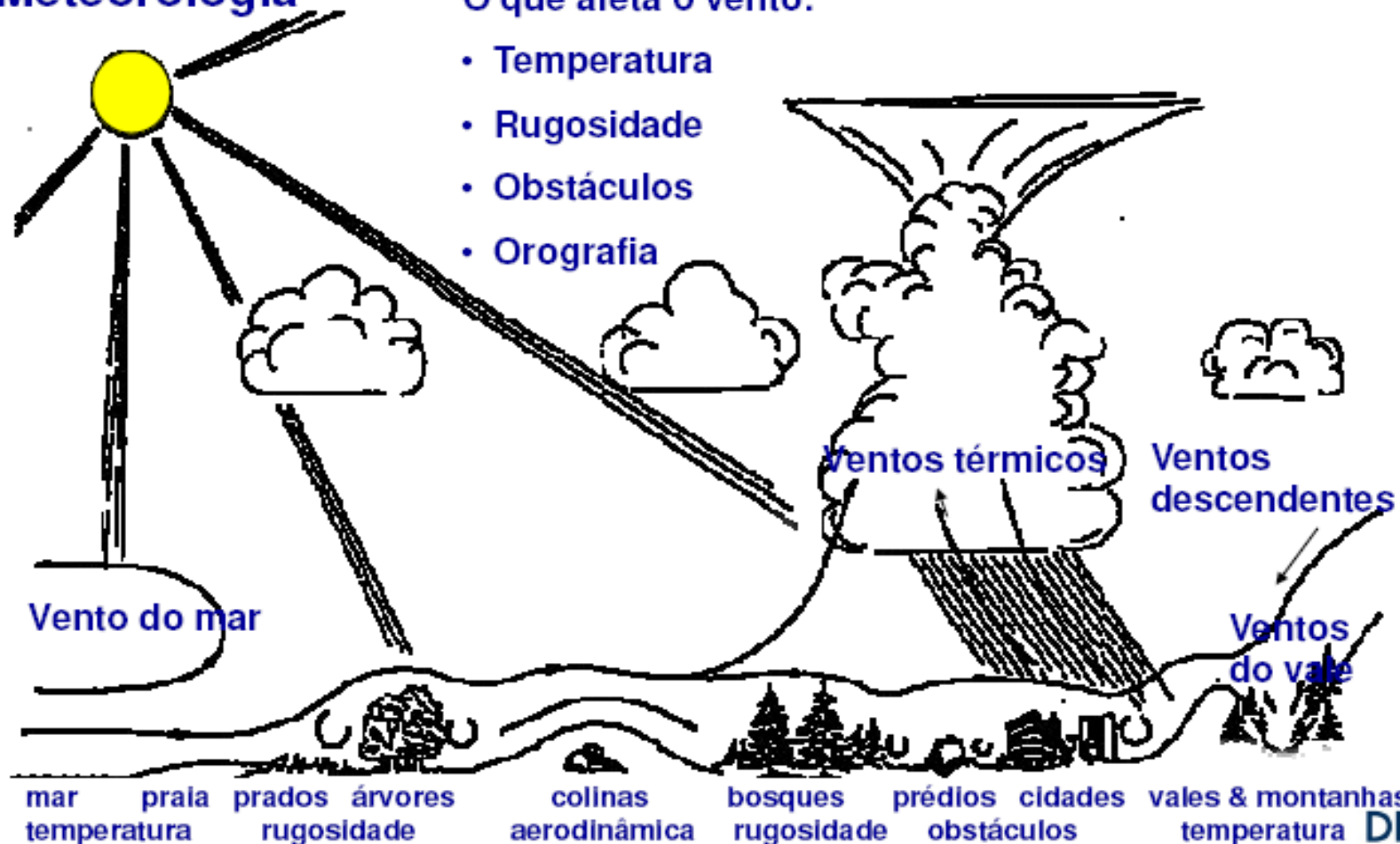
**As frequências das direções do vento têm influência importante no lay-out de um parque eólico!**

# Fatores que influenciam na distribuição local do vento

## Meteorologia

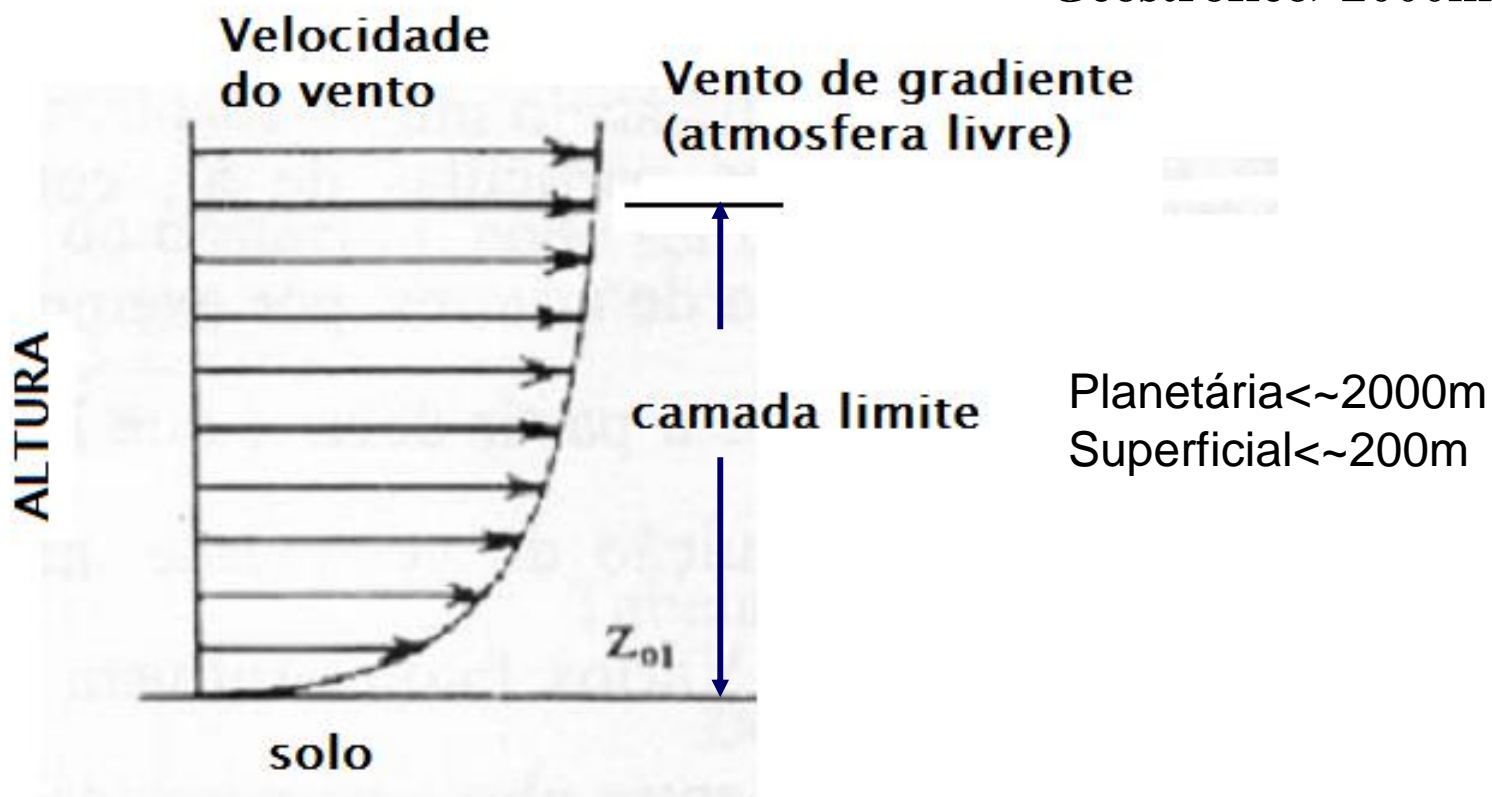
O que afeta o vento:

- Temperatura
- Rugosidade
- Obstáculos
- Orografia



# CAMADA LIMITE ATMOSFÉRICA

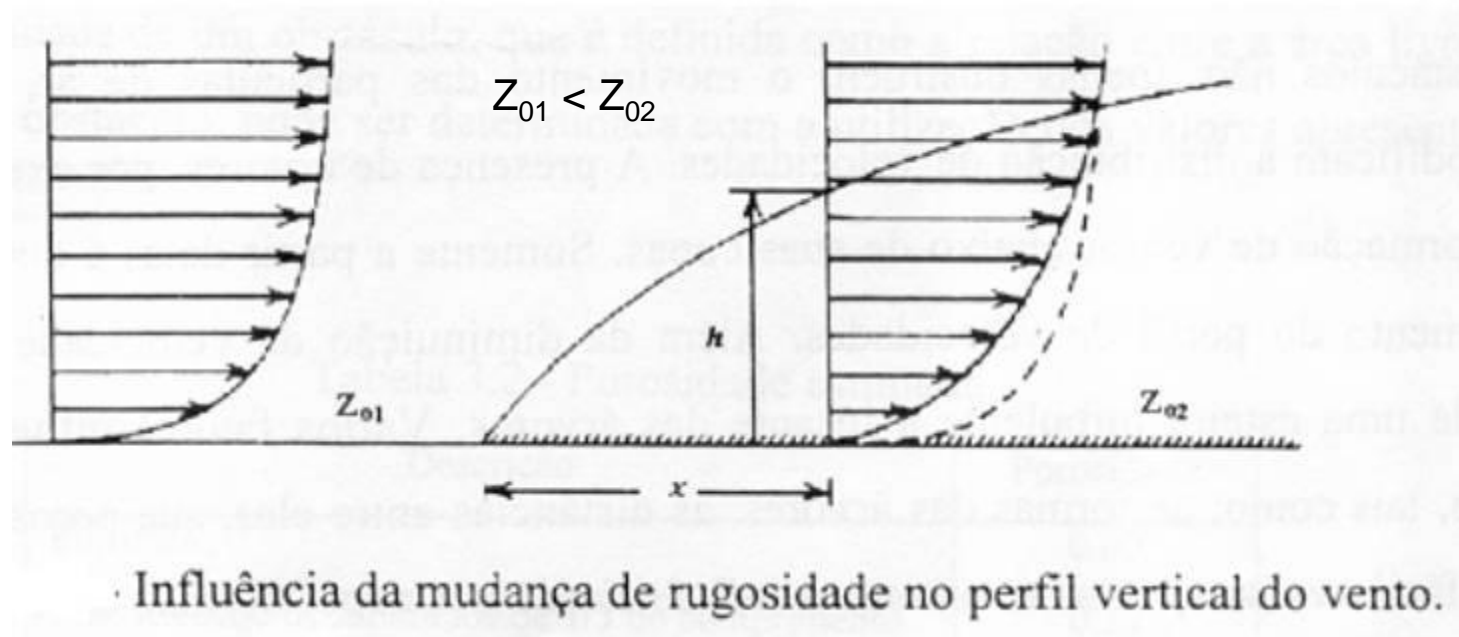
Geostrófico > 2000m





# INFLUÊNCIA DO TERRENO NO PERFIL DO VENTO

## Fluxo em terreno plano com a mudança de rugosidade



**Comprimento de rugosidade ( $Z_0$ ):** altura abaixo da qual a velocidade do vento é zero, caso o vento tenha um comportamento logarítmico com a variação de altura (ou seja, dentro da camada limite superficial).

# Distribuição da velocidade do vento com a altura

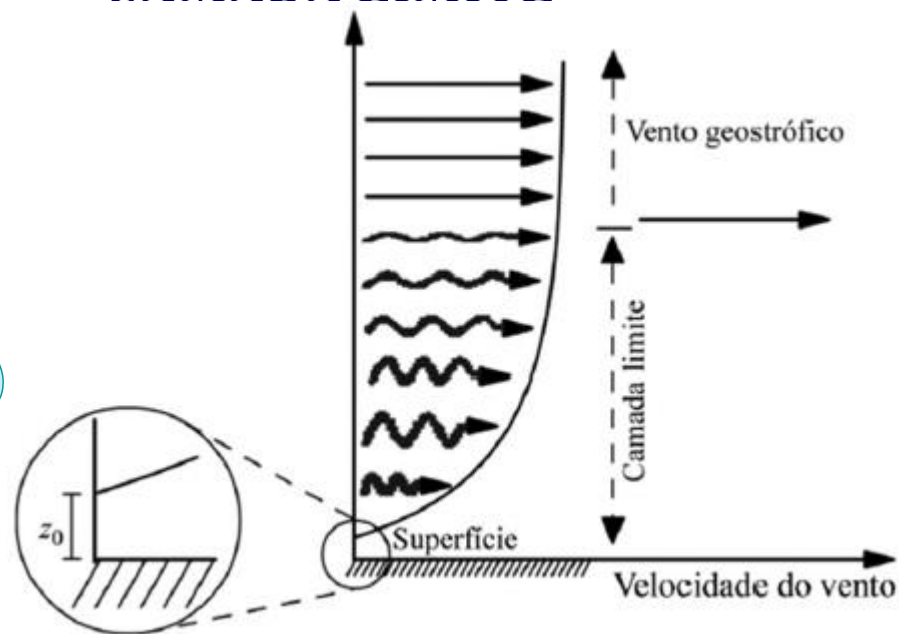
## Lei da Potência

V - velocidade na altura desejada  
Vo - velocidade na altura conhecida  
H - altura desejada  
Ho - altura conhecida  
n - fator de rugosidade do terreno

$$V = V_o \left( H / H_o \right)^n$$

Obs: n também é denominado fator de cisalhamento

## CAMADA LIMITE



Descrição do terreno	n
Terreno sem vegetação	0,10
Terreno gramado	0,12
Terreno cultivado	0,19
Terreno com poucas árvores	0,23
Terreno com : muitas árvores, cerca viva ou poucas edificações	0,26
Florestas	0,28
Zonas urbanas sem edificações altas	0,32

$\rho = 1,2256 \text{ kg/m}^3$  (Ao nível do mar, T=15°C, 1 atm)

## Distribuição da velocidade do vento com a altura na camada limite

### Lei Logarítmica

$$V(z) = V(z_r) \frac{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_o}\right)}$$

$z_o$  – comprimento de rugosidade (m) (altura média dos obstáculos à passagem do vento)

$V(z)$  – velocidade do vento na altura  $z$  (m/s)

$z_r$  – altura de referência (m) (altura na qual  $V(z_r)$  foi medida)

Obs. da Lei da Potência e da Lei Logarítmica resulta a seguinte expressão para o cálculo de fator de cisalhamento:

$$n = \frac{\ln\left(\frac{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_o}\right)}\right)}{\ln\left(\frac{z}{z_r}\right)}$$

## Valores de comprimento de rugosidade para alguns tipos de terrenos - $Z_0$

Descrição do terreno	$Z_0$ (mm)
Liso, gelo, lama	0.01
Mar calmo	0.20
Mar agitado	0.50
Neve	3.00
Gramado	8.00
Pasto acidentado	10.00
Campo em declive	30.00
Cultivado	50.00
Poucas árvores	100.00
Muitas árvores, poucos edifícios, cercas	250.00
Florestas	500.00
Subúrbios	1500.00
Zonas urbanas com edifícios altos	3000.00

Fonte : Manwell, 2004

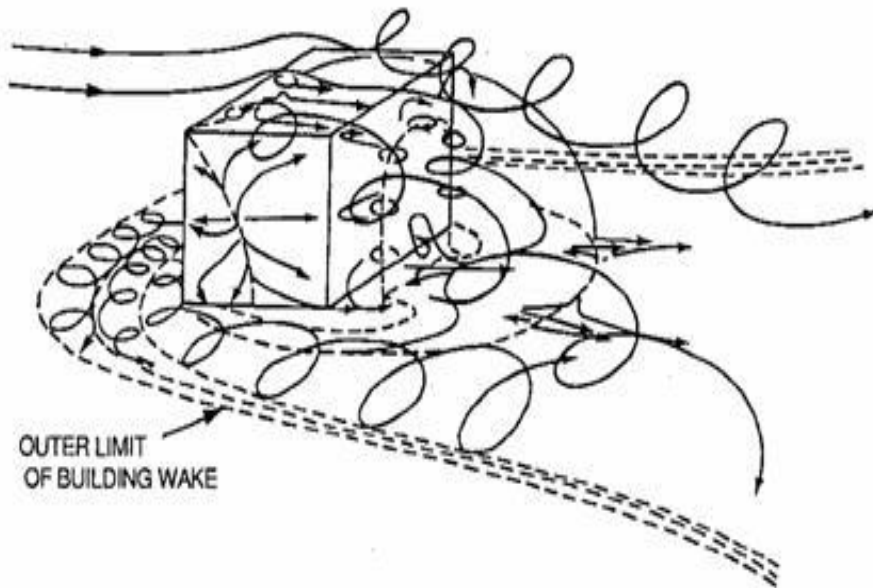
## Perfil do vento em terrenos planos com obstáculos

Os **obstáculos** são elementos de dimensões conhecidas e podem causar reduções na velocidade: produzem o efeito chamado de sombreamento. Os obstáculos não apenas obstruem o movimento de partículas de ar como também modificam a distribuição da velocidade.

Ex. de obstáculos: pedras, rochas, edifícios, agrupamento denso de árvores de grande altura, silos, etc.

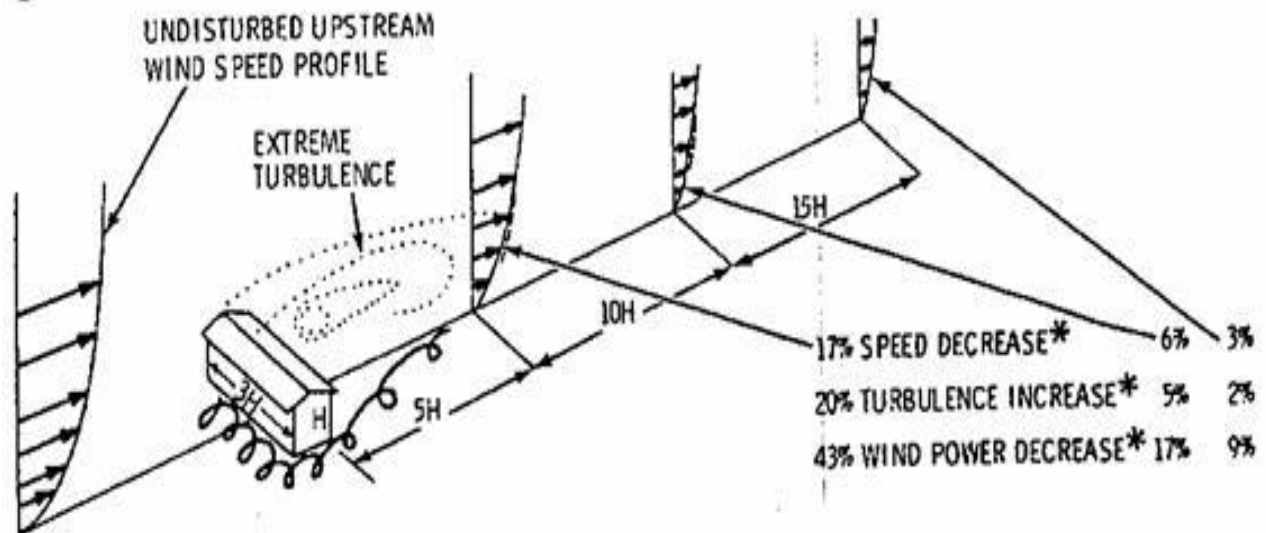
O perfil do escoamento é influenciado por vários fatores como: forma dos obstáculos, distância entre eles, sua porosidade, etc

A área influenciada pela presença de obstáculos – *sheltering effect* – pode estender-se até três vezes a sua altura, no sentido vertical, e até quarenta vezes essa mesma altura, no sentido horizontal, na direção do vento.



## Perfil do vento em terrenos com obstáculos

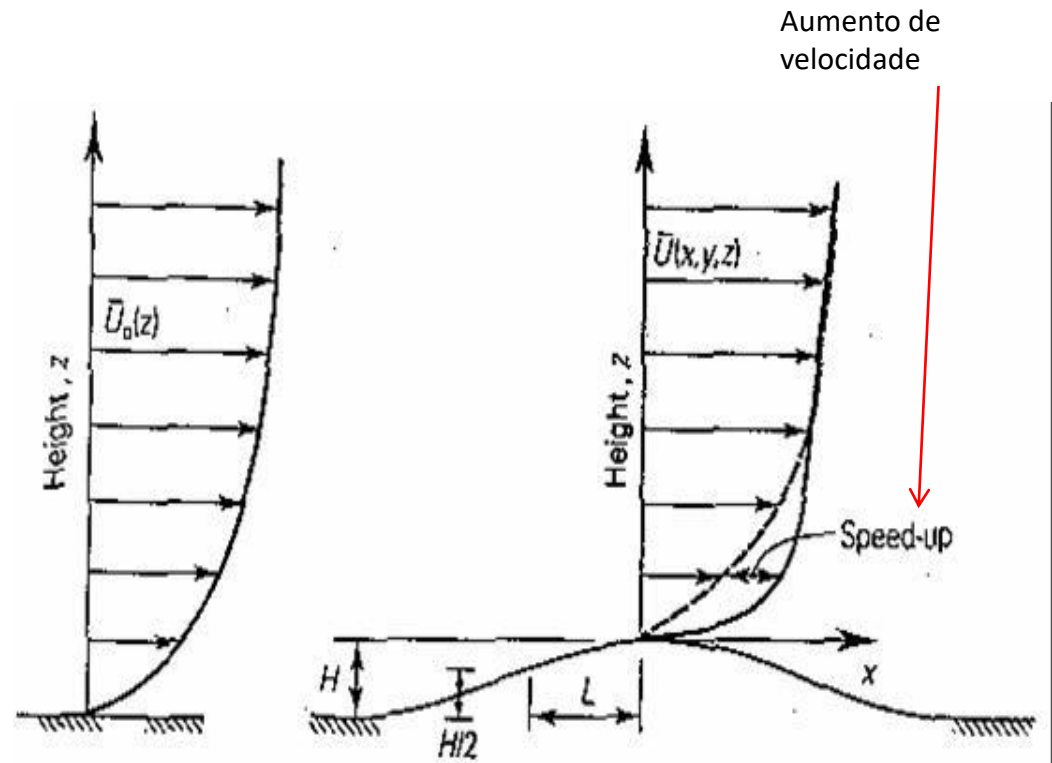
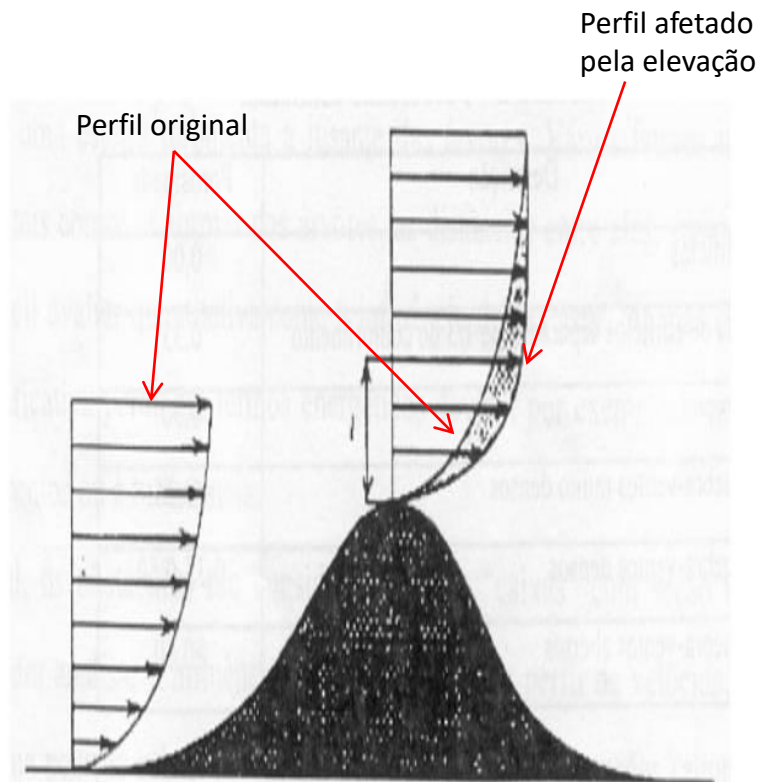
$H$  = altura do edifício



# INFLUÊNCIA DO TERRENO NO PERFIL DO VENTO

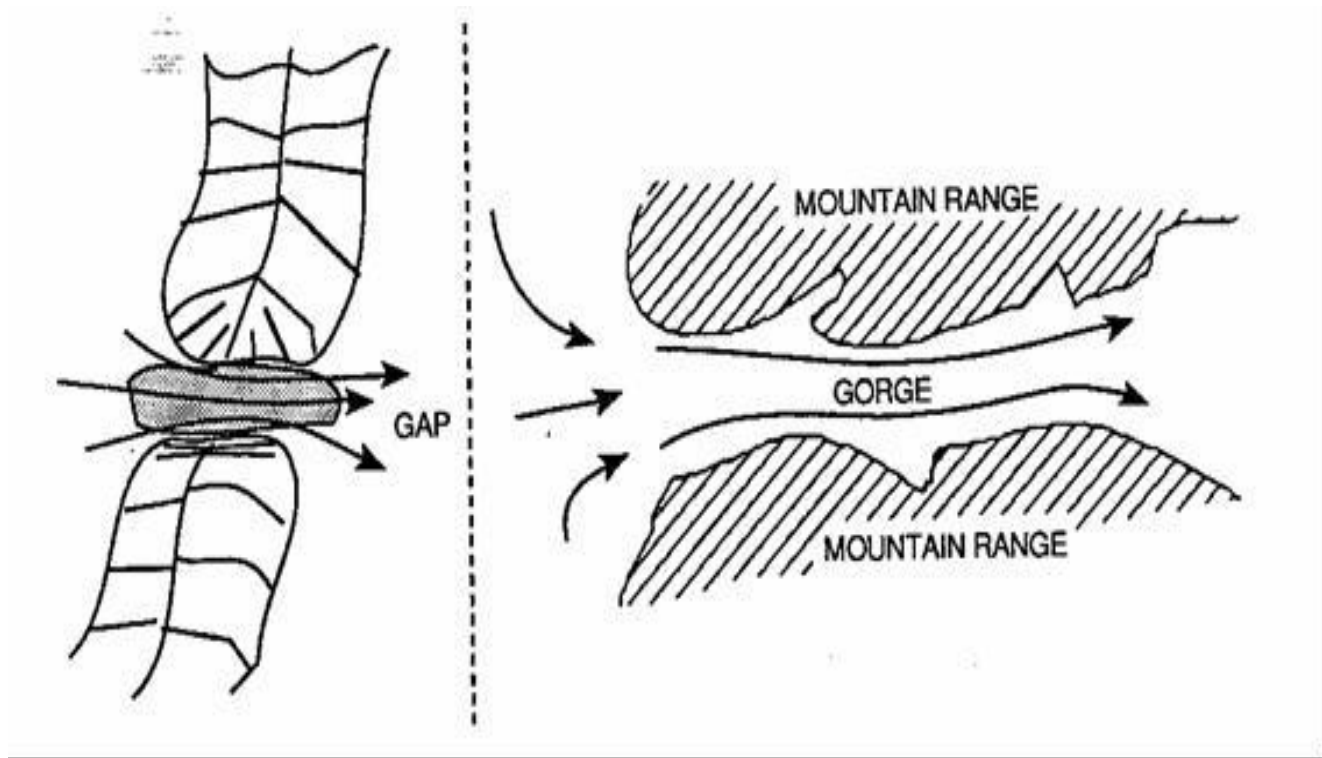
**Orografia** : variações na altura do terreno. Ex: presença de colinas, vales e depressões

## Elevações no terreno



# Gargantas e Passagens

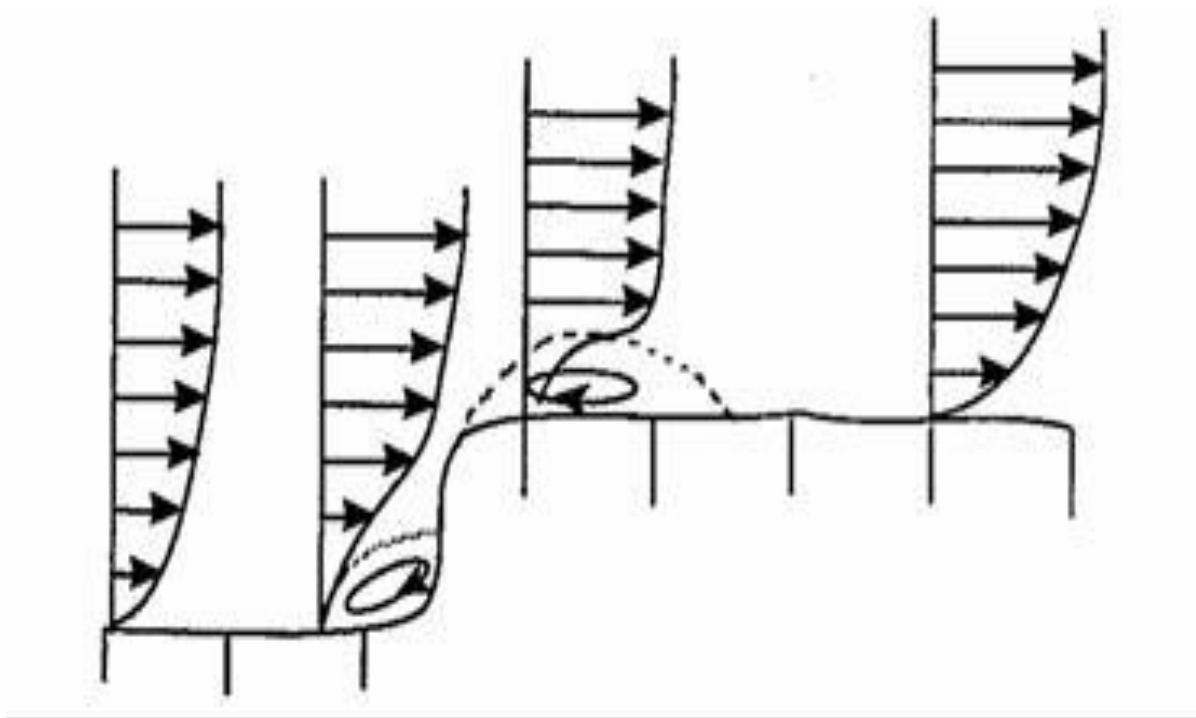
(afunilamento)



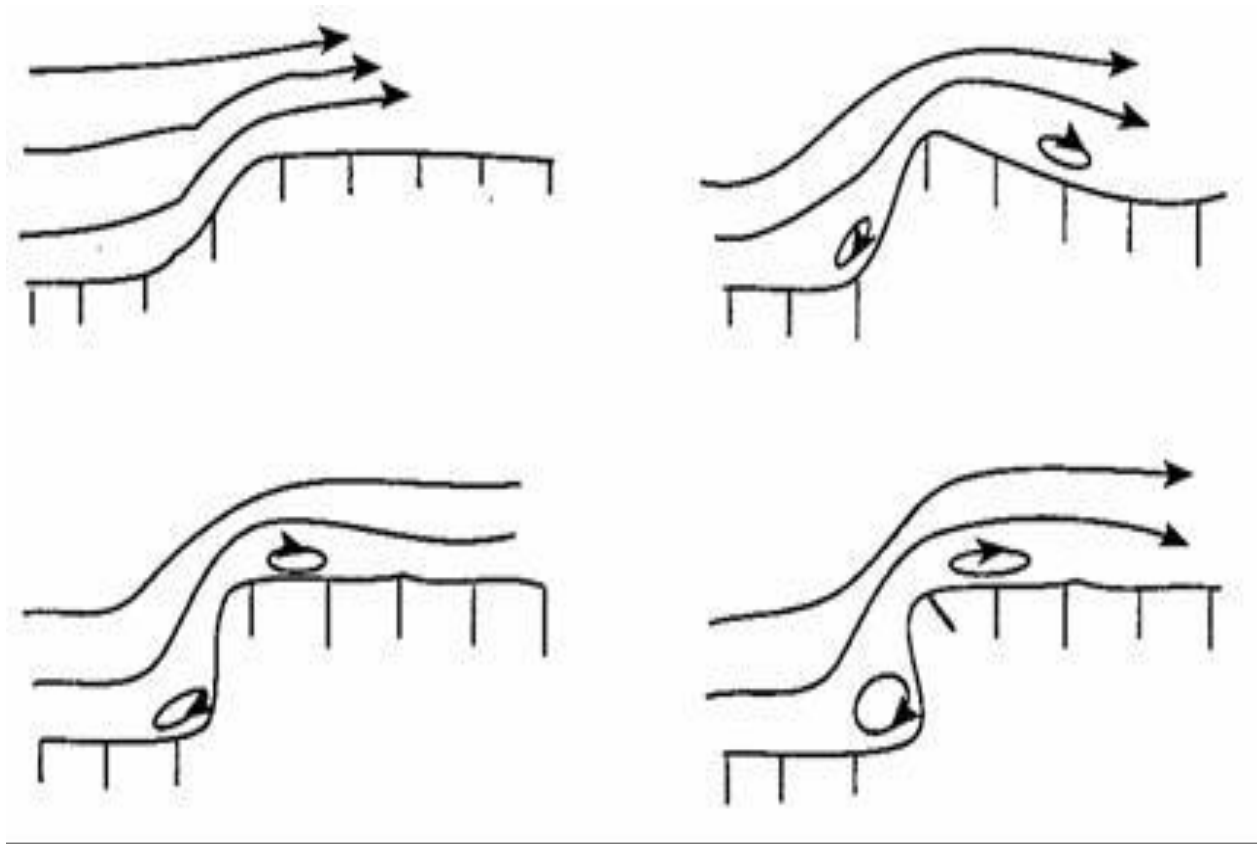


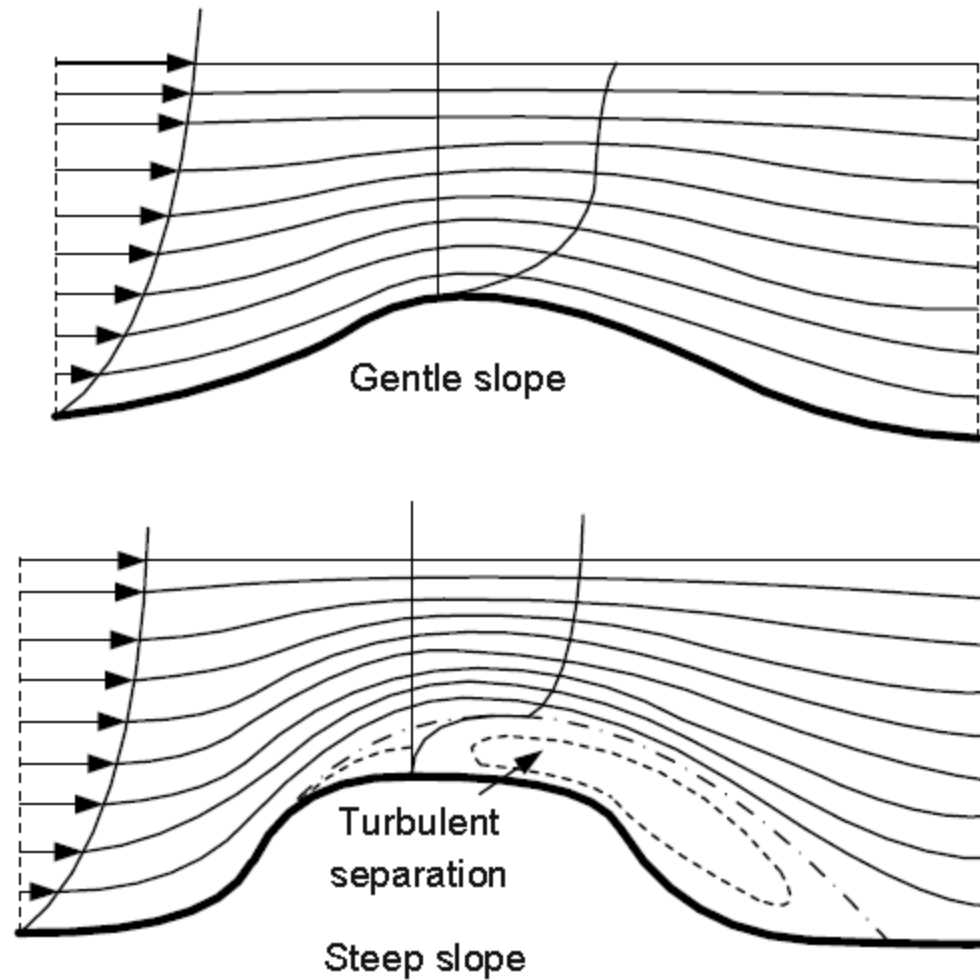
# Falésias e Chapadas

(elevações abruptas)



# Acidentes geográficos





**Fig. 4-11** Influence of topography and roughness on the vertical wind profile [9]

# **CARACTERIZAÇÃO DO REGIME DE VENTO E LEVANTAMENTO DE POTENCIAL EÓLICO**

**O Regime de vento é avaliado considerando-se:**

- fatores geográficos**
- indicações da direção em que sopram**
- altura de medição**
- características do terreno**
- parâmetros atmosféricos ( temperatura, pressão)**

**Informações utilizadas para não só estimar a produção de energia de uma turbina como também escolher o melhor local para instalação considerando aspectos de produção, custos, impactos ambientais, etc**

# MÉTODOS DE ANÁLISE DOS DADOS E CARACTERIZAÇÃO DO RECURSO EÓLICO

Assumindo que uma grande quantidade de dados é coletada, há inúmeras formas de compactar estes dados de tal modo que possamos avaliar o recurso eólico ou o potencial de produção de potência eólica num determinado local. Incluem-se técnicas diretas preliminares, usadas quando se tem uma limitada quantidade de dados de um local ( ex: apenas a velocidade média), e análises estatísticas.

A estimativa do potencial eólico consiste na determinação da produção de energia e potência de saída de uma turbina eólica em um determinado local onde os dados de vento estão disponíveis, ou no formato de série de dados ou numa forma compactada (velocidade média, desvio padrão, etc ).

## 1- Método do uso direto dos dados (estimativa preliminar)

Grandezas estatísticas utilizadas na estimativa do regime de ventos

$$V = \bar{v} \pm \Delta v$$

Diagram illustrating the components of the wind velocity equation  $V = \bar{v} \pm \Delta v$ :

- $\bar{v}$  is labeled as **Velocidade média** (Average velocity).
- $\Delta v$  is labeled as **flutuação** (fluctuation).
- $\sigma_r$  is labeled as **Desvio padrão** (Standard deviation).
- $V$  is labeled as **Velocidade instantânea** (Instantaneous velocity).

1- Velocidade média do período ( longo prazo)

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$$

**N = número de observações (tamanho da amostra)**

2- Desvio padrão

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( V_i - \bar{V} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{i=1}^N V_i^2 - N \bar{V}^2 \right\}}$$

# Cálculo da Energia Produzida - Introdução

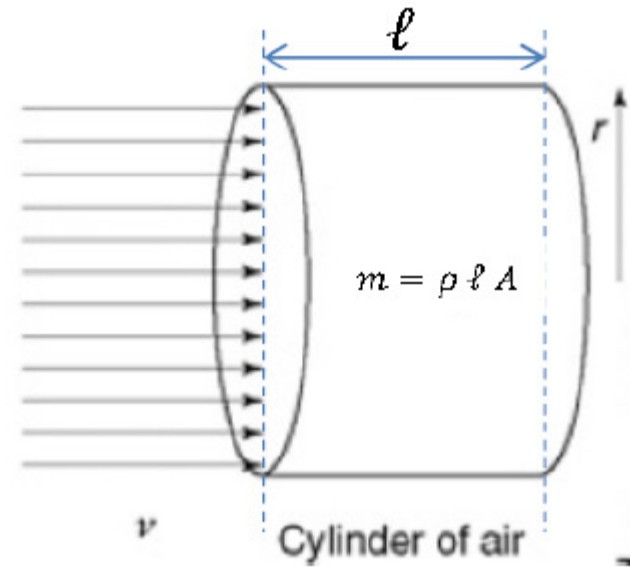
## Energia disponível

### Energia Cinética do Vento

(ar em movimento contido em um cilindro de raio  $r$  e comprimento  $\ell$ ):

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$m = \rho \ell A$$



Unidades:  $E_{cin} : \frac{[kg][m^2]}{[s^2]} : \text{Joule}$

## Potência

**Potência** ( $P_{ot}$ ): mede a taxa de transferência de Energia Cinética no tempo

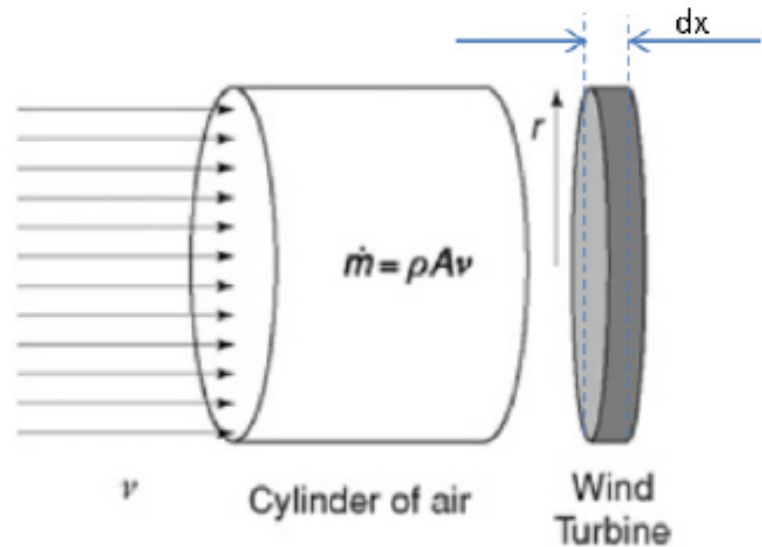
Energia Cinética da “fatia”  $dx$ :

$$dE_{cin} = \frac{1}{2} dm v^2, \text{ com } dm = \rho A dx.$$

Portanto,

$$dE_{cin} = \frac{1}{2} \rho A dx v^2$$

$$P_{ot} = \frac{dE_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \rho A \underbrace{\frac{dx}{dt}}_{=v} v^2 \rightarrow$$



$$P_{ot} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

(Potência disponível)



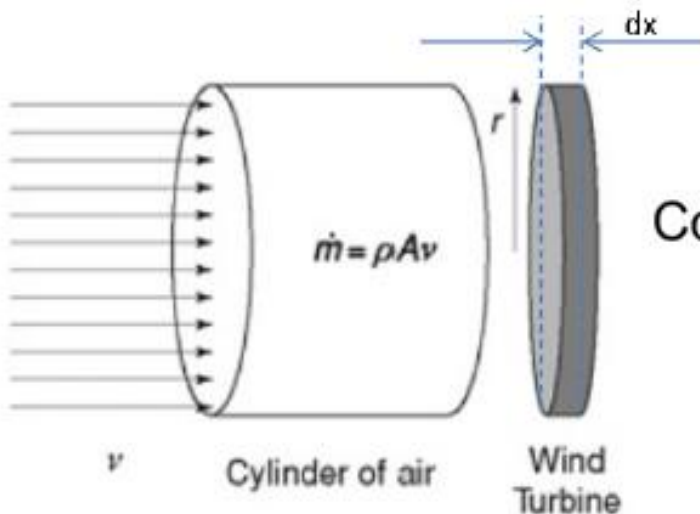
## Potência

Analogamente, calcula-se Potência como a energia transferida pelo fluxo de massa  $\dot{m}$  :  $P_{ot} = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$  ,

com  $\dot{m} = \rho v A$  (em  $\frac{kg}{s}$ ). Portanto,

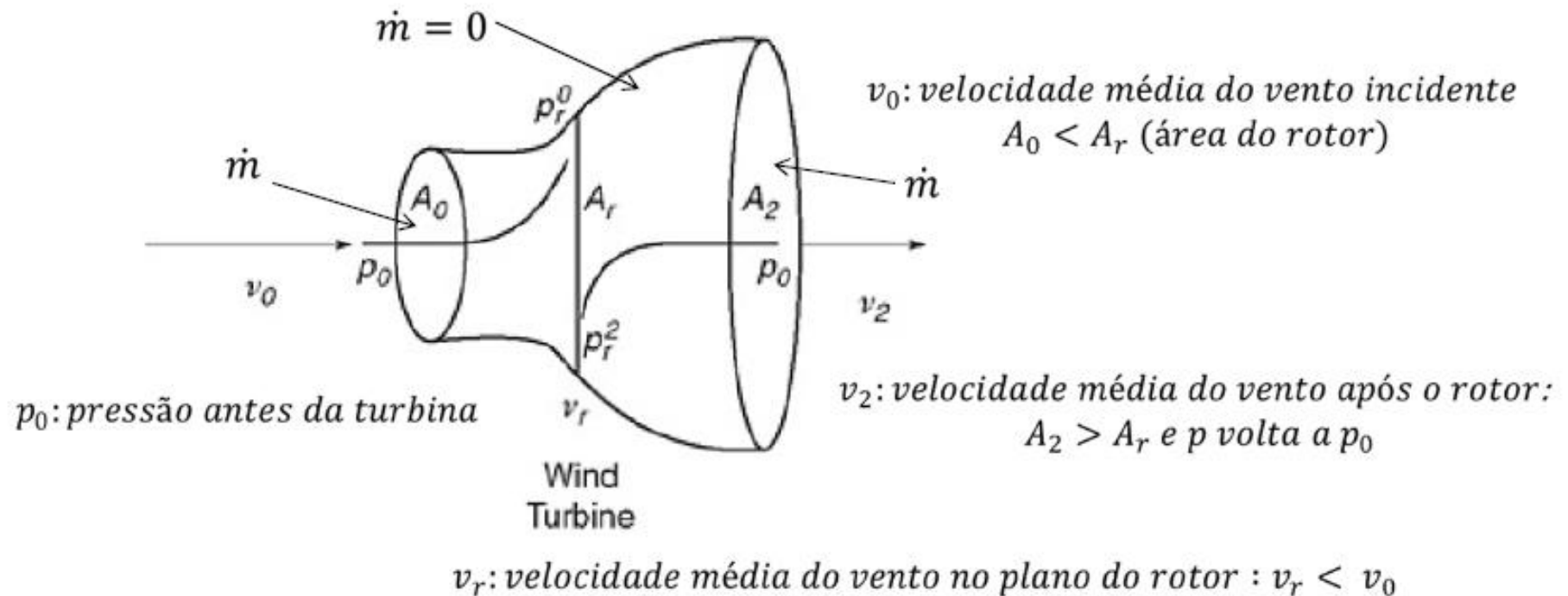
$$P_{ot} = \frac{1}{2} \rho v A v^2 \rightarrow P_{ot} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

Unidade:  $P_{ot} : \frac{[kg][m^2][m^3]}{[m^3][s^3]} = \frac{[kg][m^2]}{[s^2]} / [s] = \frac{Joule}{s} : Watt$



$$\text{Como } A = \pi r^2 \rightarrow P_{ot} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3$$

# Lei de Betz (máxima potência que pode ser extraída, 1919)

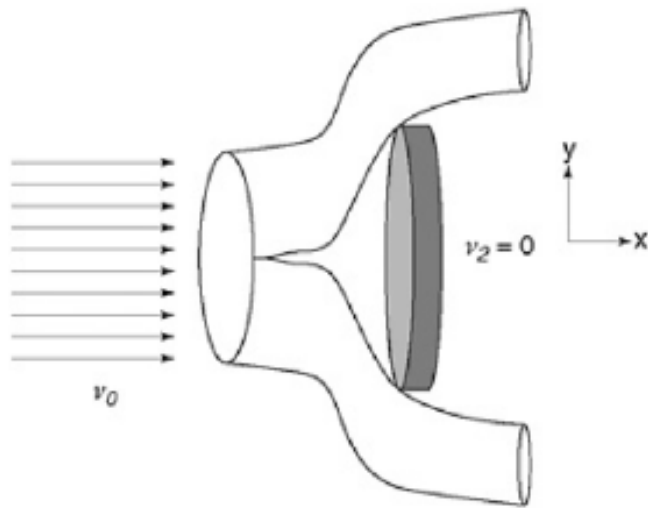


$p_r^0$ : pressão imediatamente antes do rotor

$p_r^2$ : pressão imediatamente após o rotor

Após a passagem pelo rotor a pressão volta a  $p_0$ ; a velocidade volta a  $v_0$  mais adiante.

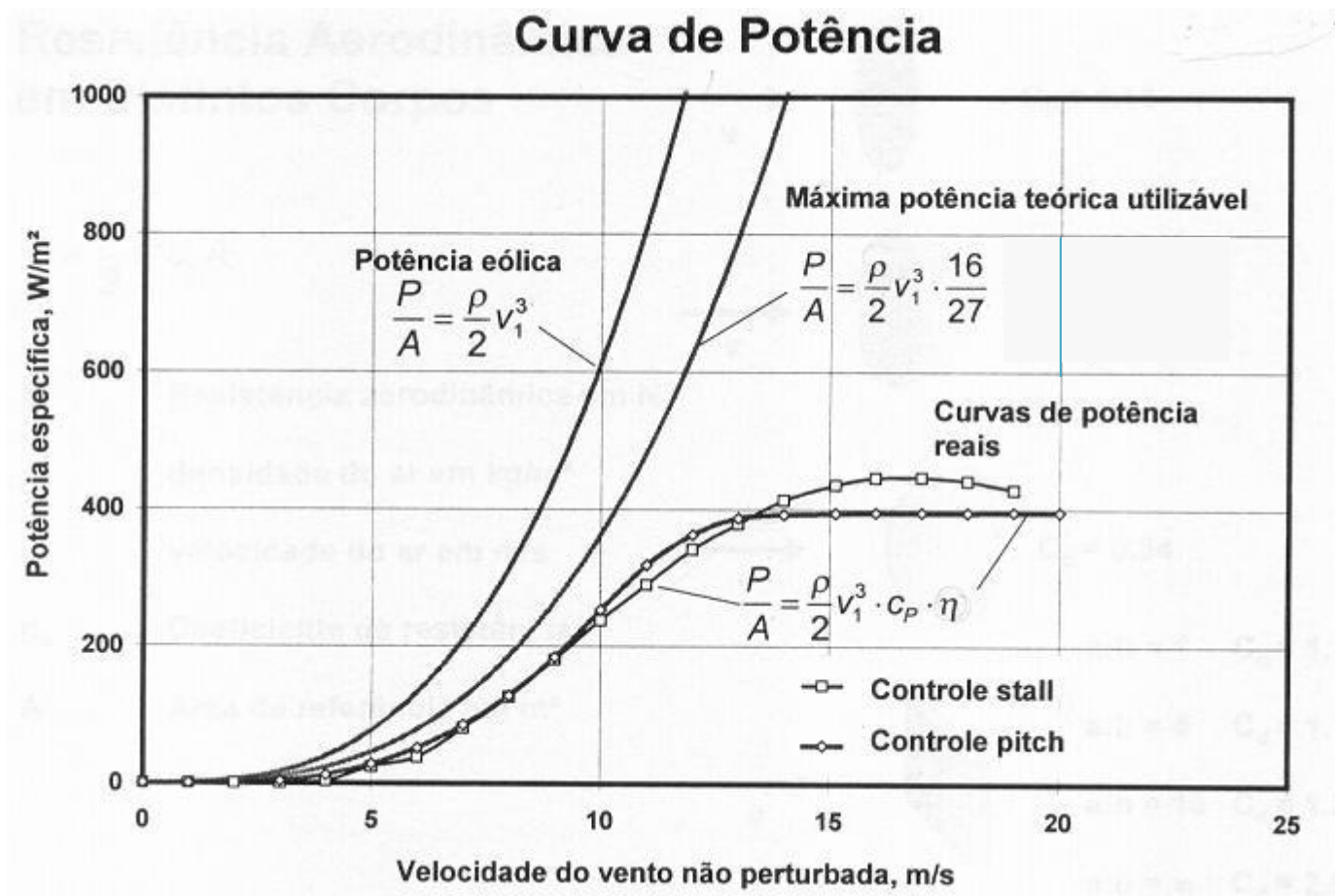
## Lei de Betz (máxima potência que pode ser extraída)



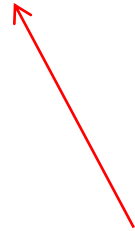
Se o rotor for sólido (impermeável),  $\dot{m} = 0$  e não há extração de potência; nesta situação  $v_2 = 0$ .

A Lei de Betz demonstra que a máxima potência que pode ser extraída do vento é igual a  $16/27$  (ou, 59,3%) da potência disponível; essa situação ocorre quando  $v_2 = \frac{1}{3} v_0$ . O “Coeficiente de Potência” de uma turbina é dado por  $C_p = \frac{(\text{Potencia extraída})}{(\text{Potencia disponível})}$ , ou,  $C_p = \frac{(\text{Potencia extraída})}{(\frac{1}{2} \rho A v^3)}$

# Curva de potência de uma turbina



## Densidade média de potência (eólica) – $P/A$ (Watts/m<sup>2</sup>)

$$\frac{\bar{P}}{A} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i^3$$


Obs.: não é  $\bar{V}^3$

O potencial eólico será empregado para estimar a potência produzida pelas turbinas:

## Curva de potência de uma turbina eólica

A potência disponível no vento é: 
$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3$$

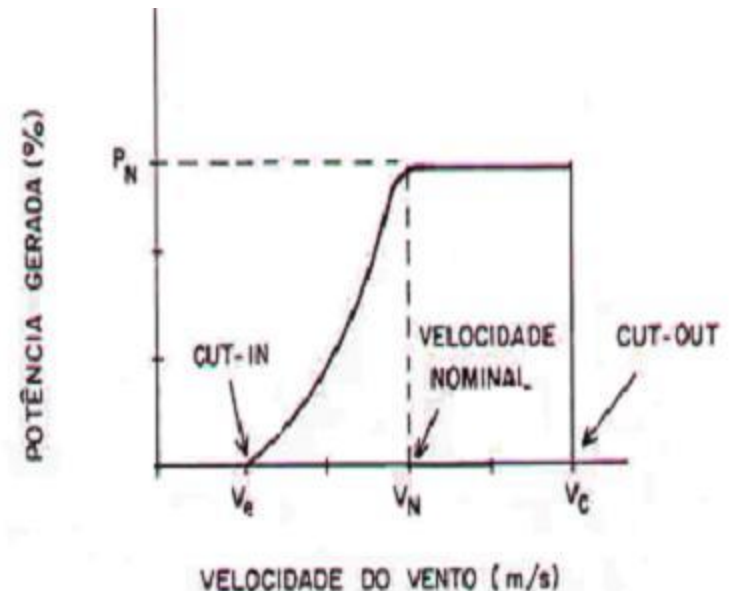
Na prática, a potência “ $P_e$ ” fornecida por uma turbina eólica em função da velocidade do vento é determinada pela curva de potência da turbina

A curva de potência ilustra três importantes velocidades características:

$V_E$  – Velocidade a partir da qual a turbina começa produzir energia (cut in)

$V_N$  – Velocidade do vento em que a turbina atinge a sua potência nominal

$V_C$  – velocidade do vento a partir da qual a turbina é desligada para evitar problemas estruturais (cut out)



## Análise estatística; exemplo (Ref. Custódio, R. S., Energia Eólica, 2013)

Tabela 3.1 Tabulação dos dados de vento na forma de frequência de distribuição

Velocidade do Vento (m/s)	Nº de Ocorrências	Frequência Relativa (%)
0-1	47	0,74
1-2	160	2,51
2-3	700	10,97
3-4	1.007	15,78
4-5	993	15,56
5-6	853	13,37
6-7	766	12,01
7-8	644	10,09
8-9	447	7,01
9-10	270	4,23
10-11	250	3,92
11-12	134	2,10
12-13	78	1,22
13-14	36	0,56
14-15	23	0,36
15-16	5	0,08
16-17	6	0,09
17-18	2	0,03
18-19	1	2,02
19-20	3	0,05
>20	0	0,00
Total	6.425	100

1007/6425

...Análise estatística; exemplo (Ref. Custódio, R. S., Energia Eólica, 2013)

Gráfico das frequências relativas (discreto)

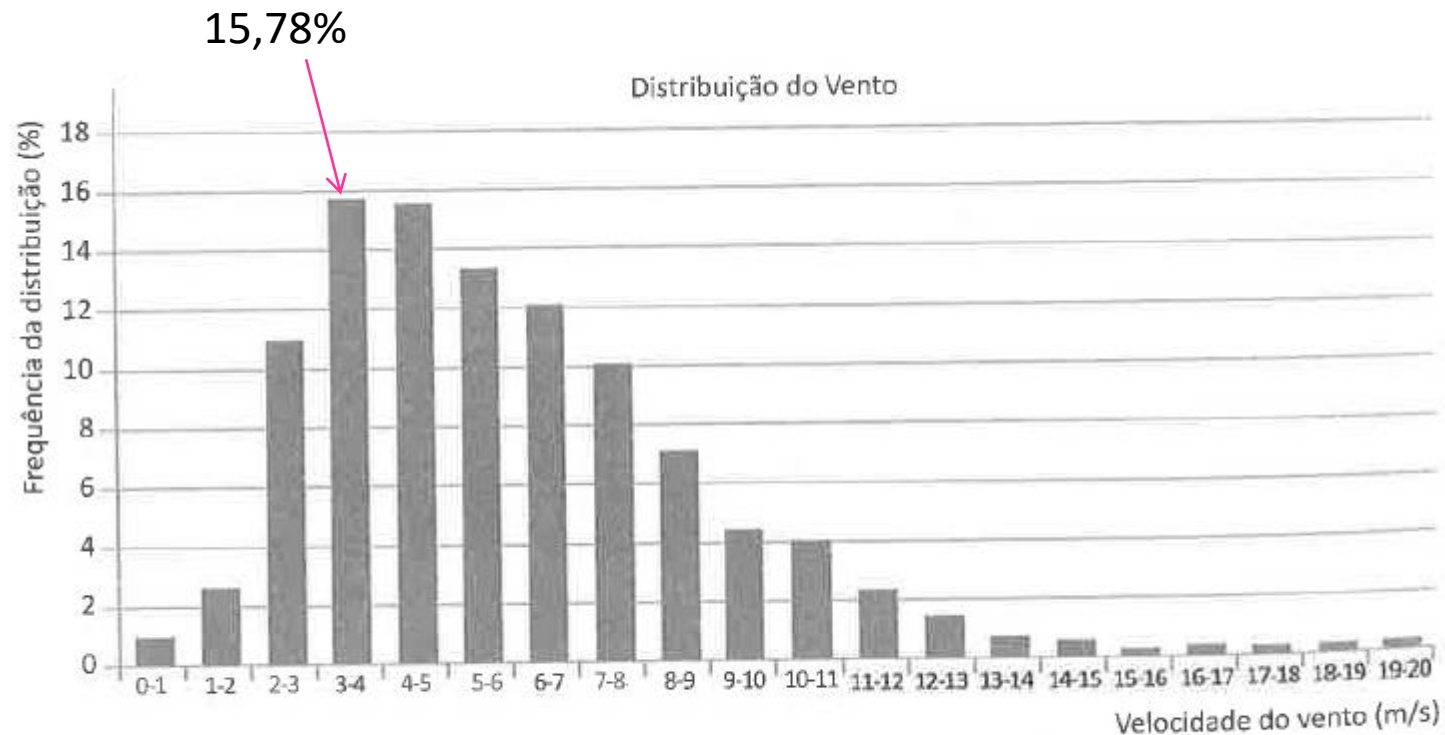


Figura 3.7 Frequência de distribuição da velocidade do vento.



...Análise estatística (Ref. Custódio, R. S., Energia Eólica, 2013)

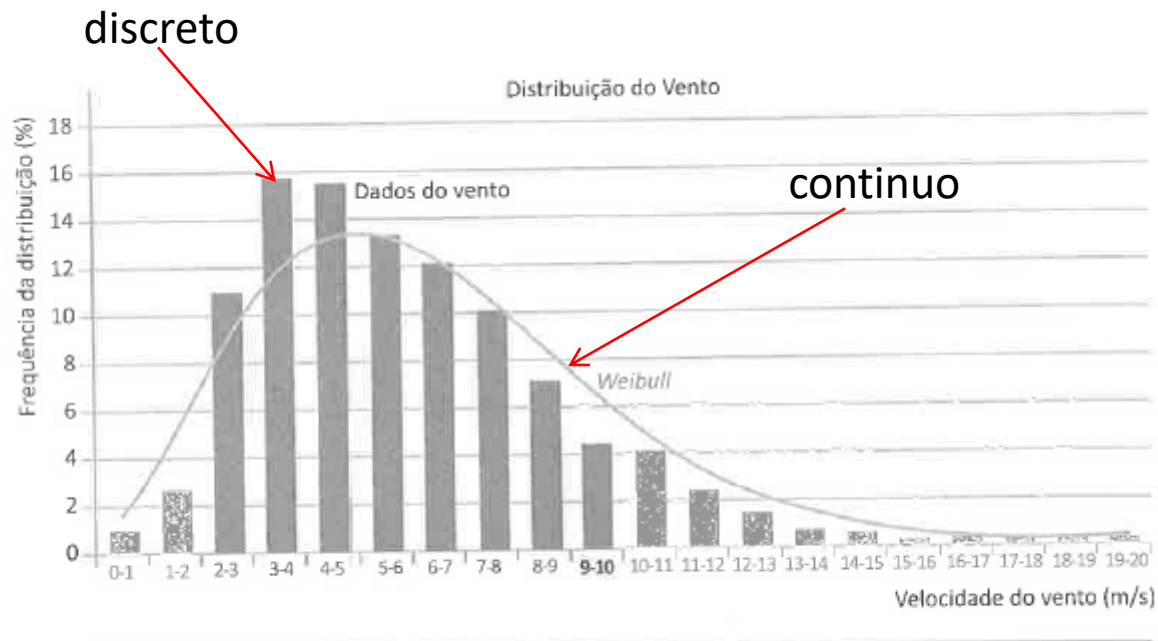
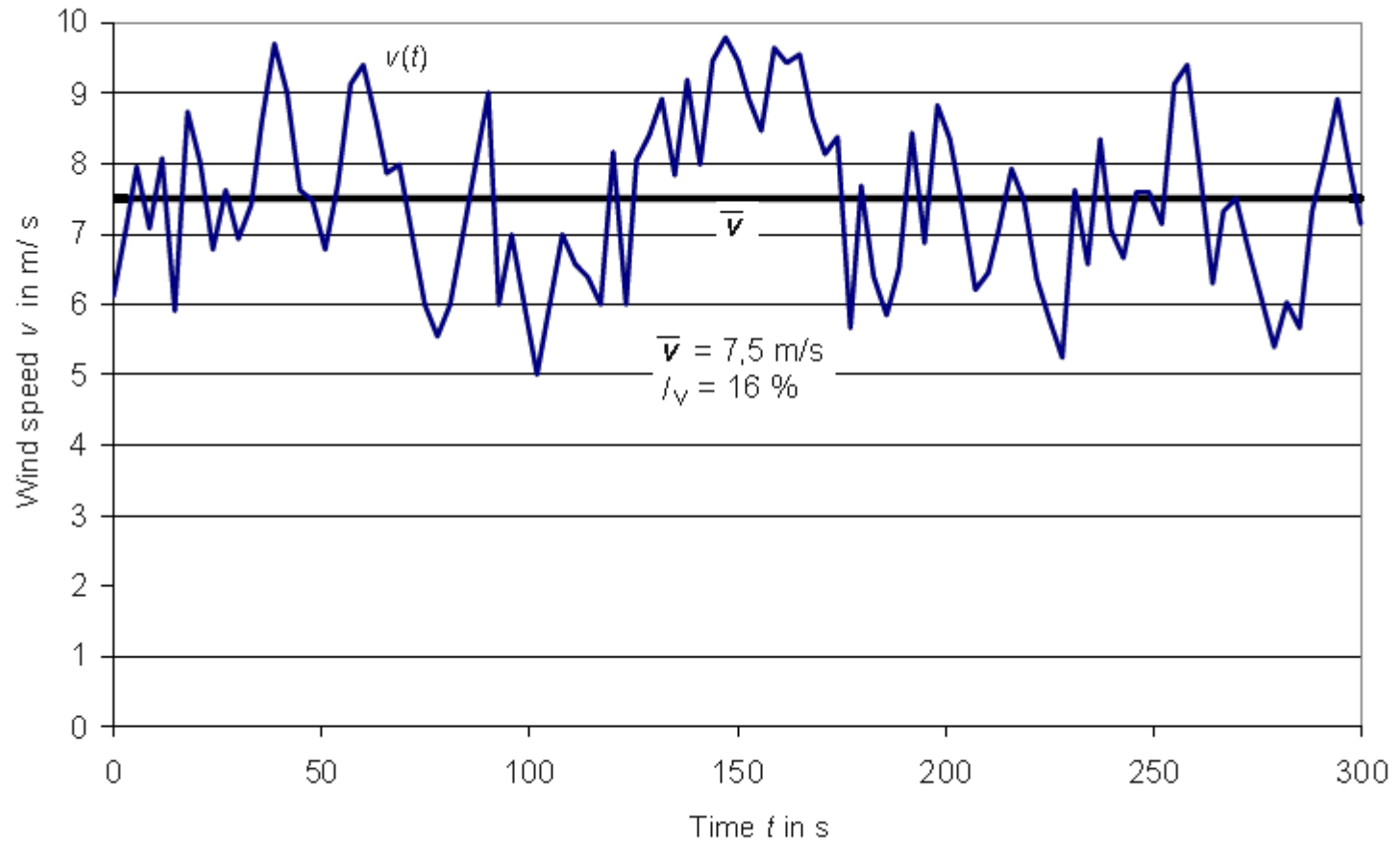


Figura 3.6 Frequência de distribuição da velocidade do vento.

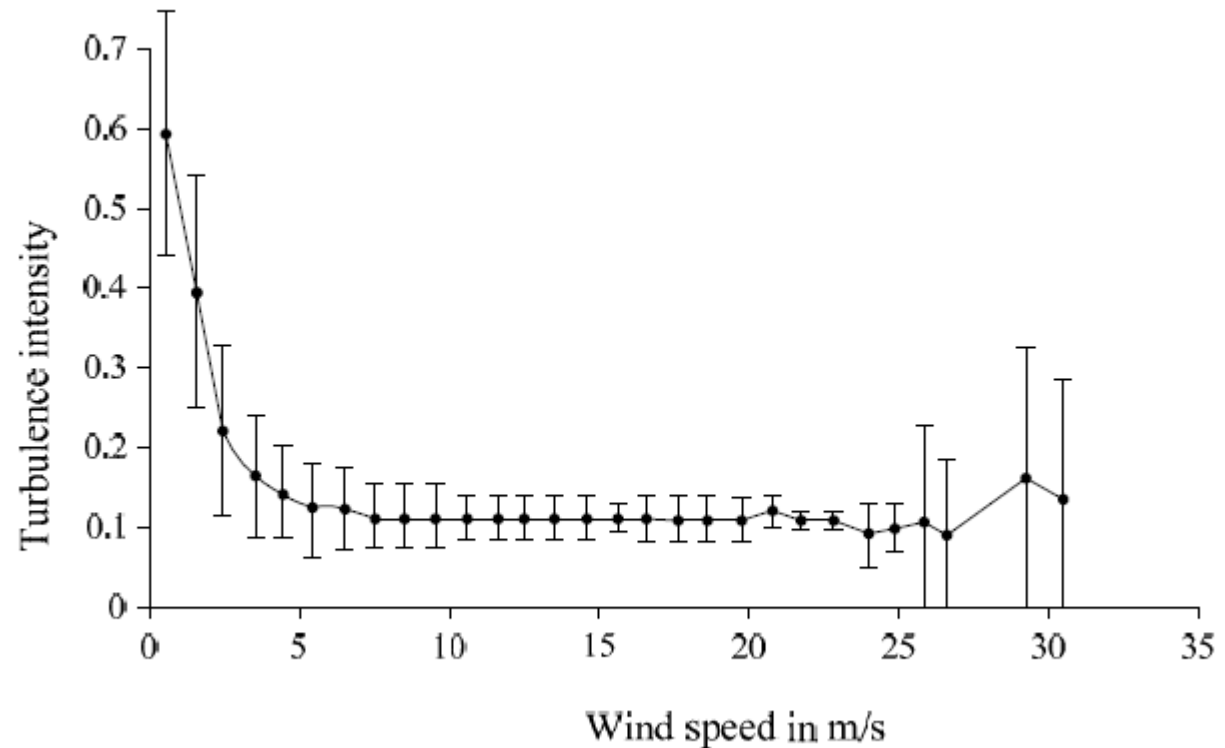
Obs.: Avaliação da Turbulência

Exemplo: 5 minutos de medição

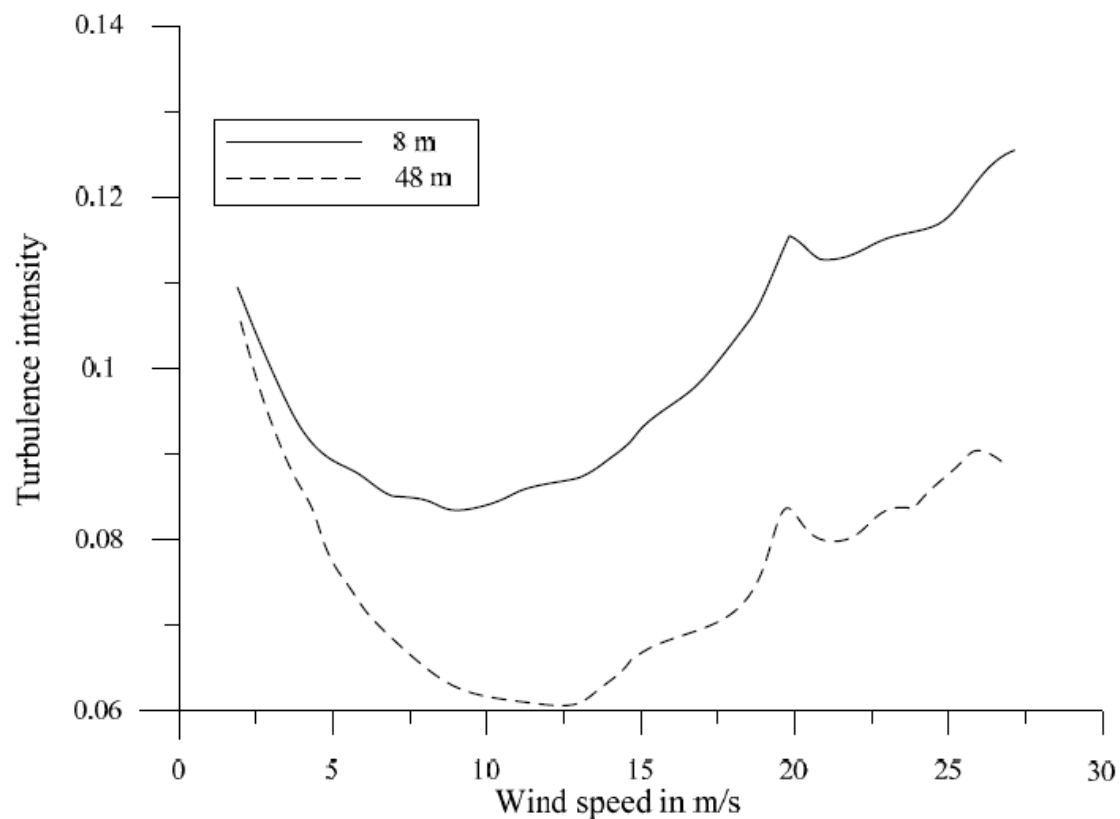


Obs. Turbulência: em linhas gerais, mede a relação entre o desvio padrão e a velocidade média do vento:

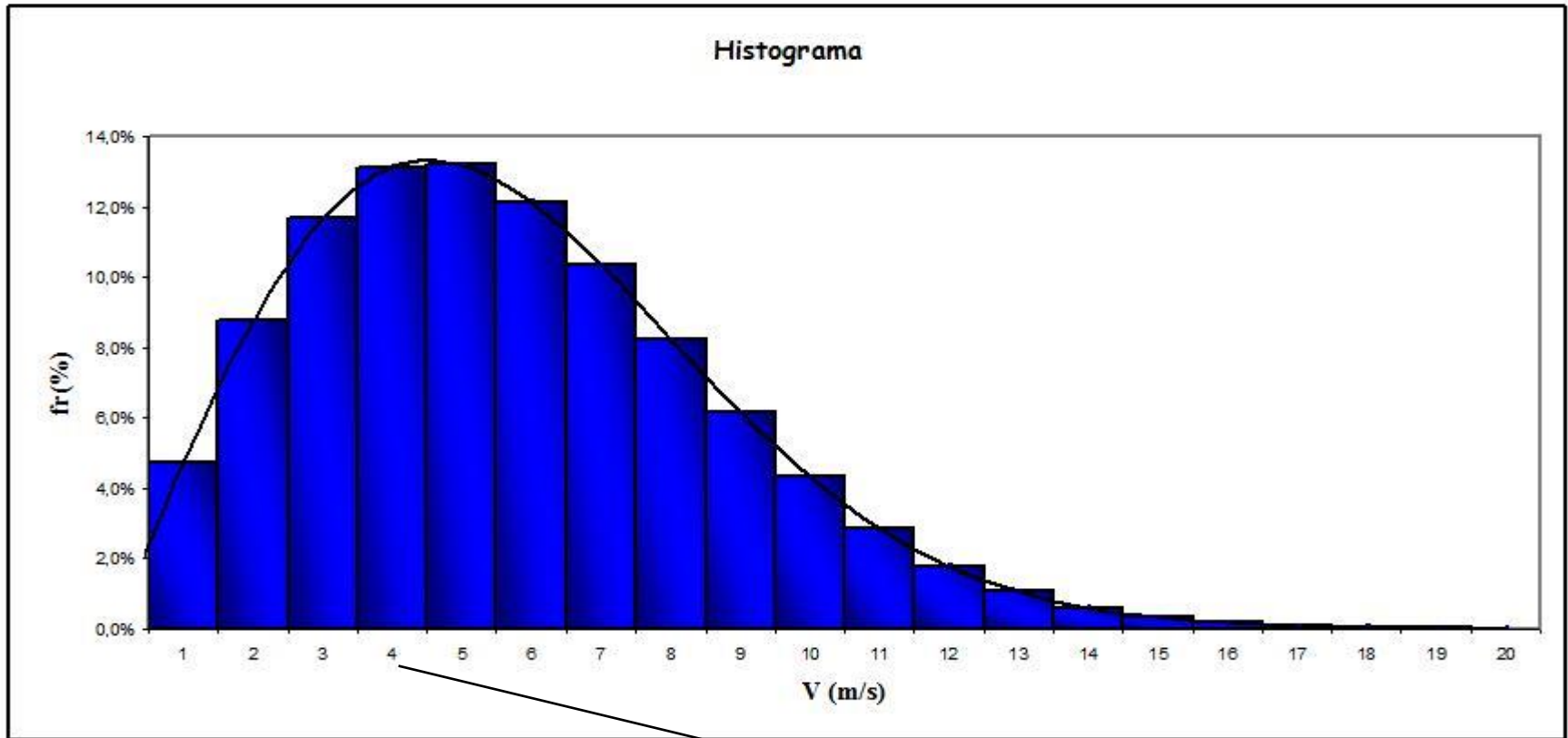
$$I_V = \frac{\sigma_v}{\bar{v}}$$



A turbulência costuma ser menor nas faixas de velocidade do vento típicas da camada limite superficial (5 a 12 m/s e  $h < 200\text{m}$ ), e diminui com a altura.



## 2- Método de Classes de velocidades



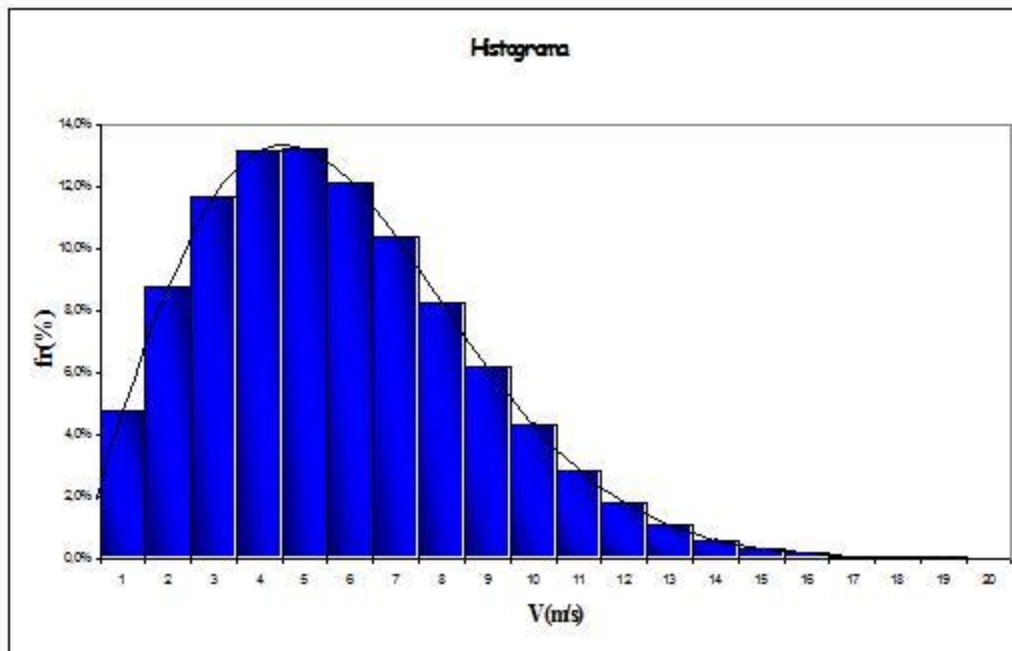
EX: Largura  $\Delta V = 1m/s$

**Histograma de velocidade do vento**

$f_j$  : frequência absoluta = **número** de observações em cada classe ou intervalo  $j$ .

$N$  : número total de observações

$fr_j$  : frequência relativa(%) = associada a cada intervalo(  $j$ ) =  $f_j/N$



$$fr_j = \frac{f_j}{N}$$

$$N = \sum_{j=1}^I f_j$$

**EX: Largura  $\Delta V = 1\text{m/s}$**

**$I$  = número total de classes ou intervalos de velocidade; Ex: 20**

**Para este caso:**

## 1- Velocidade média

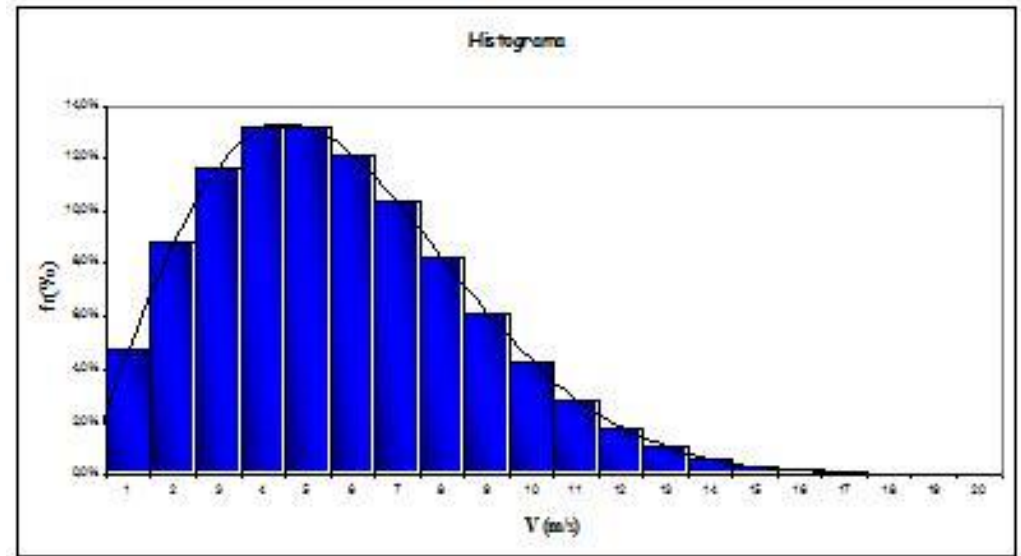
$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^I m_j f_j$$

## 2- Desvio padrão

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^I m_j^2 f_j - N \left( \bar{V} \right)^2 \right\}}$$
$$\sigma_r = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left\{ \sum_{j=1}^I m_j^2 f_j - N \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^I m_j f_j \right\}^2 \right\}}$$

onde:

$m_j$  = valor médio de cada intervalo =  $\left[ V_{\min} + (j-1)\Delta V \right] + \frac{1}{2} \Delta V$



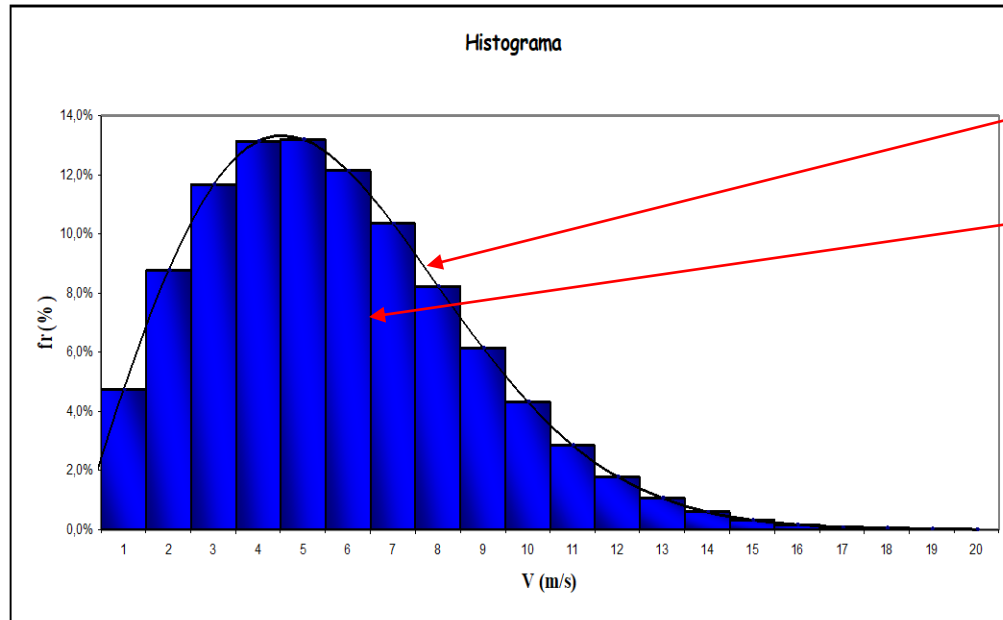
### 3- Densidade média de potência (eólica) = Watts/m<sup>2</sup>

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{j=1}^I m_j^3 f_j$$



### 3- Análise estatística das velocidades dos ventos

Representações analíticas para a distribuição probabilidades de velocidade de vento



Registros contínuos

Registros discretos

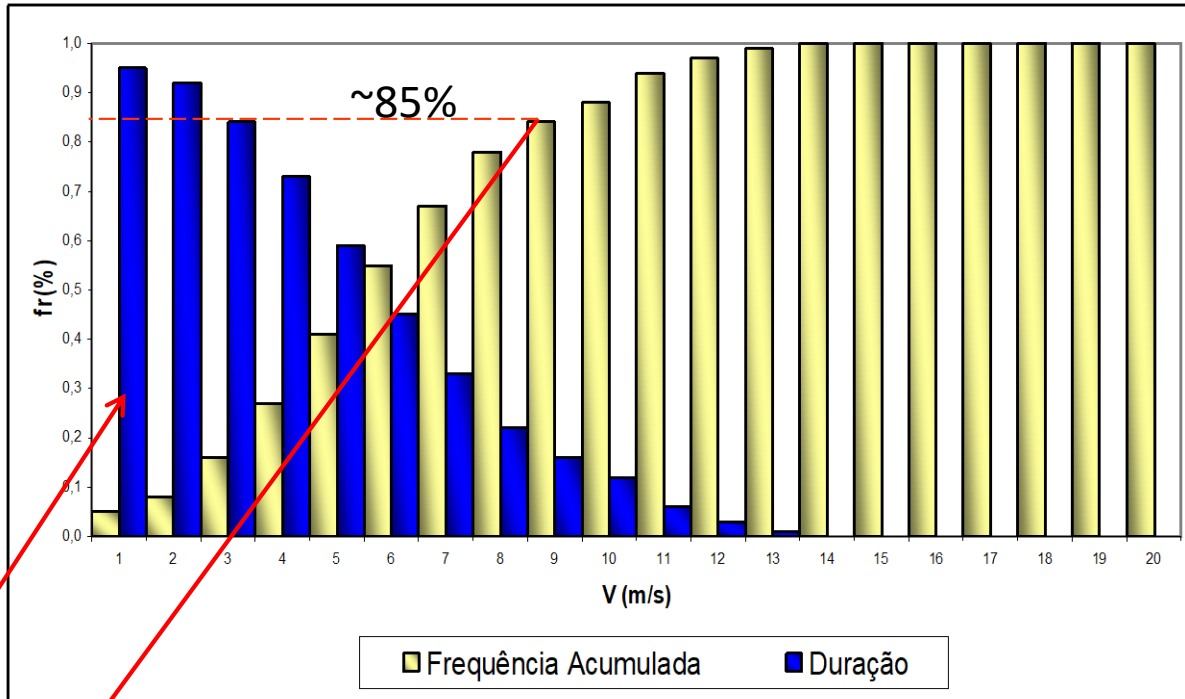
$$f_{rj} = \frac{f_j}{N} (\%) \rightarrow p(v_j) = \frac{f_j}{N} (\%)$$

$$\sum_{j=1}^I f_{rj} = 1 \rightarrow \int_0^{\infty} p(V) dV = 1 \rightarrow \text{Distribuição de probabilidade}$$

$$p(V_a \leq V \leq V_b) = \int_{V_a}^{V_b} p(V) dV \rightarrow \text{Função densidade de probabilidade}$$

$$F(V_0) = p(V \leq V_0) = \int_0^{V_0} p(V) dV \rightarrow \text{Função distribuição ou probabilidade acumulada}$$

## Curva de frequência acumulada e duração da velocidade dos ventos



$$f_{rj} = \frac{f_j}{N} (\%)$$

(freq. relativa)

$$\sum_{j=1}^I f_{rj} = 1$$

**Curva de frequência :**  $F(V_j) = p(V \leq V_j) = (fr_1 + fr_2 + fr_3 + \dots + fr_I)$ ; (i.e., probabilidade de V ser inferior a  $V_j$ ; por exemplo, a probabilidade de V ser inferior a  $V_j = 9$  m/s é de ~ 85%).

**Curva de duração :**  $1 - F(V_0) = P(V \geq V_j) = 1 - (fr_1 + fr_2 + fr_3 + \dots + fr_I)$ ; obs.: o  $N^\circ$  horas com  $V \geq V_j = (N^\circ \text{ horas de medição de velocidade}) \times P(V \geq V_j)$ .

**Se  $p(v)$  (distribuição de probabilidade) for conhecida, os seguintes parâmetros podem ser calculados:**

**Velocidade média:** 
$$\bar{V} = \int_c^{\infty} V p(V) dV$$

**Desvio padrão:** 
$$\sigma_V = \sqrt{\int_c^{\infty} \left( V - \bar{V} \right)^2 p(V) dV}$$

**Potência eólica média por unidade de área :  $P/A = \text{Watts/m}^2$**

$$\frac{\bar{P}}{A} = \left( 1/2 \right) \rho \int_0^{\infty} V^3 p(V) dV$$

$P(v_i)$  = potência esperada calculada pelo valor de  $v_i$ , dada por:

$$P(v_i) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_P \cdot \eta \cdot (v_i)^3$$

Potencia esperada empregando diretamente a função de Weibull:

$$P_e = \int_0^{\infty} f(v) \cdot P(v) \cdot dv$$

**OBS\* Potência eólica média por unidade de área :  $P/A$  (Watts/m<sup>2</sup>)**

$$\frac{\bar{P}}{A} = (1/2)\rho \int_0^{\infty} V^3 p(V) dV \neq (1/2)\rho \bar{V}^3$$

Muito embora a velocidade média seja uma informação importante, ela não deve ser empregada para estimar a densidade de potência; exemplo:

<b>Average Wind Speed, m/s</b>	<b>Incorrect Power Density, W/m<sup>2</sup></b>	<b>Correct Power Density, W/m<sup>2</sup></b>
0	0	0
1	1	2
2	5	9
3	17	32
4	39	75
5	77	146
5.6	108	206
6	132	253

$$\frac{1}{2} \rho (\bar{v})^3$$

$$\int_0^{\infty} \frac{1}{2} \rho v^3 p(v) dv$$

Potência Esperada:

$$P_e = \sum_{i=1}^n f(v_i) \cdot \Delta v \cdot P(v_i)$$

Onde,  $P_e$  = Potência Esperada;

$n$  = número de intervalos de velocidade adotados que cobrem 100% dos valores medidos no site;

$f(v_i)$  = frequência relativa das velocidades registradas em cada intervalo  $v_i$ , com  $i=1, \dots, n$ :

Ex.: Weibull: 
$$f(v_i) = \left(\frac{k}{c}\right) \cdot \left(\frac{v_i}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left[\left(\frac{v_i}{c}\right)^k\right]}$$

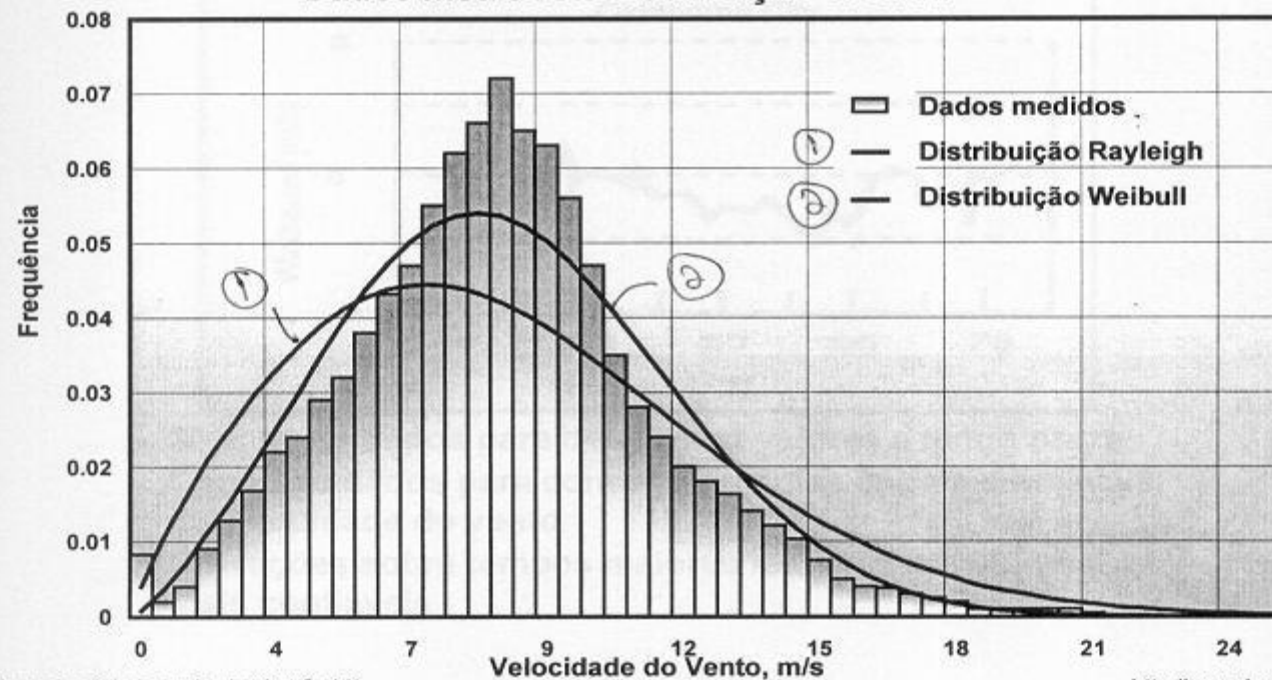
$\Delta v$  = largura dos intervalos (uniforme)

## **Distribuições probabilísticas utilizadas para representar o comportamento dos ventos**

- Distribuição normal ou Gaussiana
- Distribuição exponencial
- Distribuição de Rayleigh
- Distribuição de Weibull

## Distribuição de Frequências da Velocidade do Vento

Dados medidos e distribuição teórica

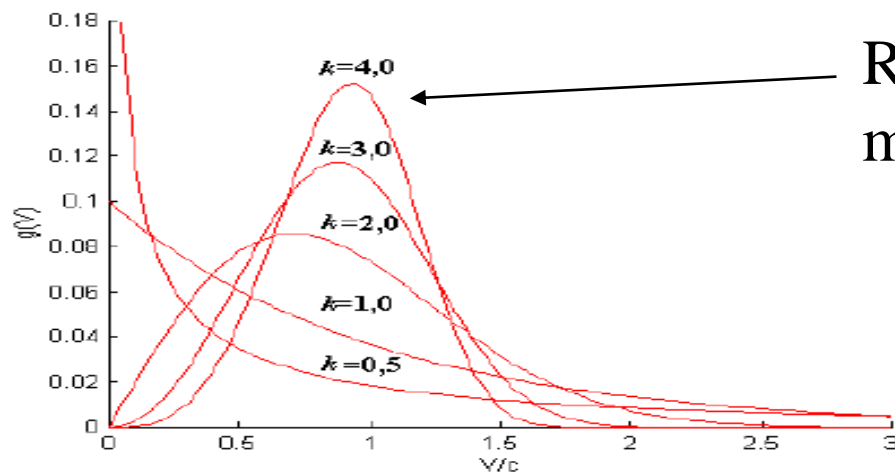


Deutsches Windenergie - Institut GmbH

<http://www.dewi.de>



## Ex: de curvas de distribuição de Weibull



Regimes e ventos mais constantes

### Influência do parâmetro k na curva de distribuição de Weibull

A função densidade de probabilidade de Weibull requer o conhecimento de dois parâmetros conforme mostrado na equação a seguir:

$$p(v) = \left[ \frac{k}{c} \right] \times \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \times e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k}$$

onde:  $p(v)$  – probabilidade de ocorrência de velocidade de vento

$v$  – velocidade do vento

$c$  – fator de escala

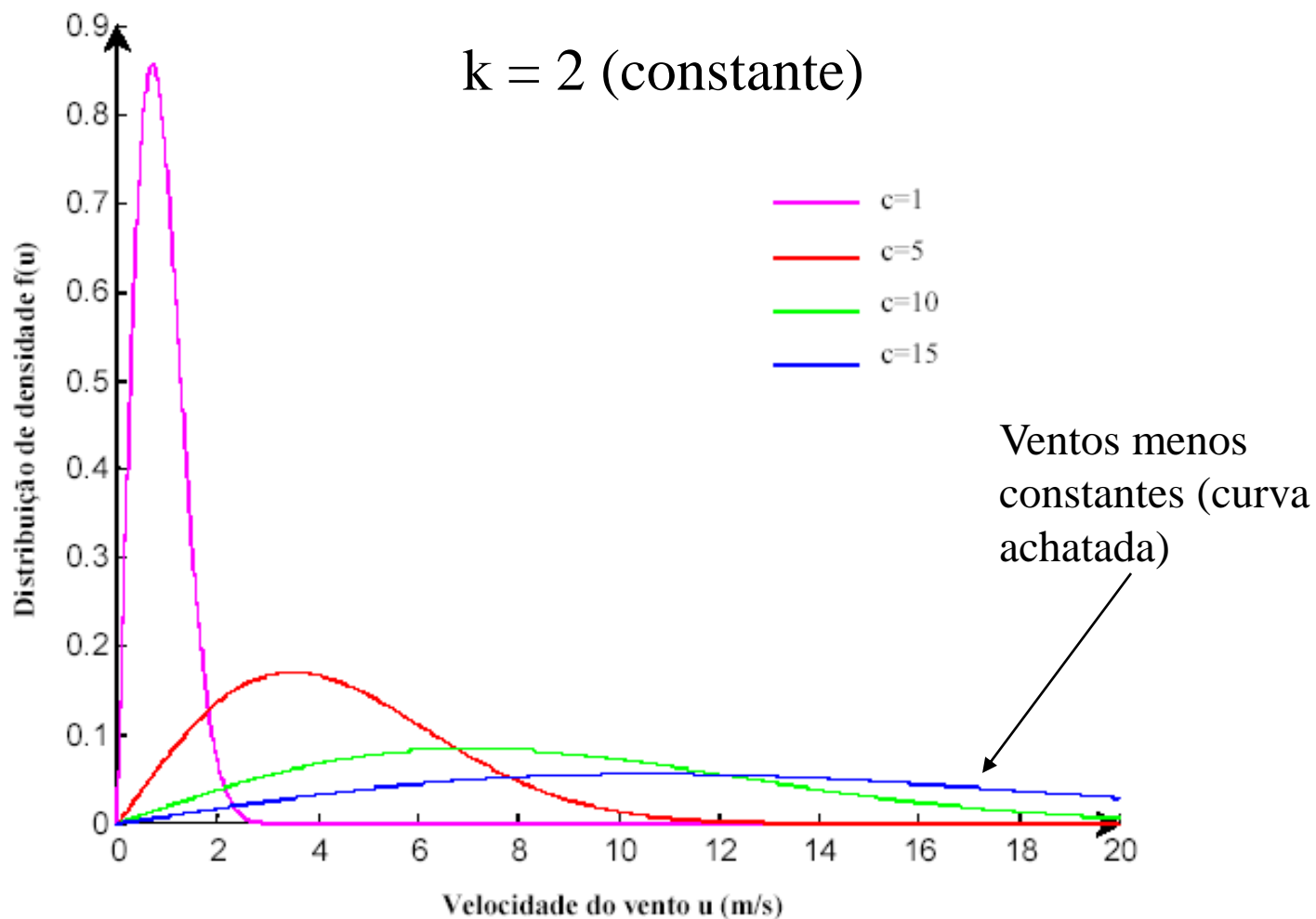
$k$  – fator de forma

Os parâmetros  $c$  e  $k$  podem ser calculados analiticamente pelas seguintes equações:

$$k = \left( \frac{\sigma_V}{\bar{V}} \right)^{-1.086} \quad c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

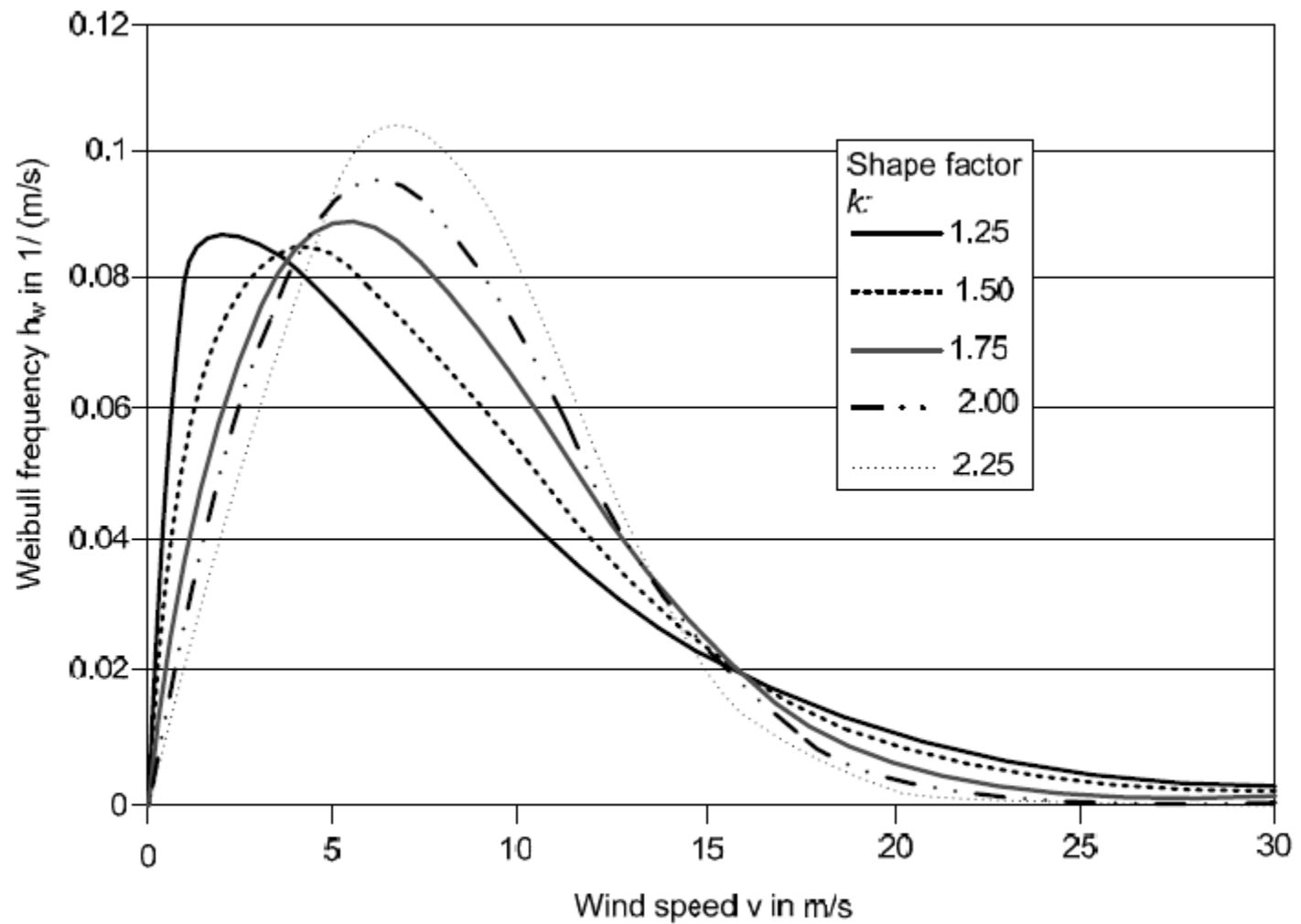
De acordo com estudos, a Distribuição de Weibull consegue retratar bem um grande número de padrões de comportamento do vento. Isso se deve principalmente porque a distribuição de Weibull incorpora tanto a distribuição exponencial ( $k=1$ ) quanto a distribuição de Rayleigh ( $k=2$ ), além de fornecer uma boa aproximação da distribuição normal (quando o  $k$  é próximo de 3,5)

Uma outra grande utilidade da função de Weibull é retratar o comportamento do ventos extremos



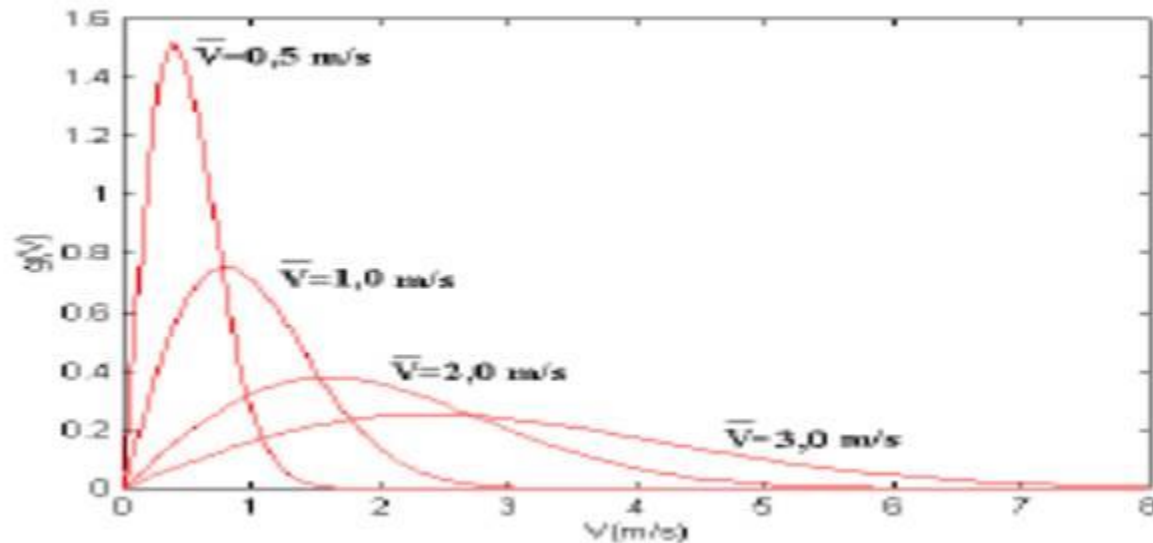
Comportamento da função de distribuição de densidade de weibull para diversos valores de  $c$ .

**Fonte: Silva, G S. Mestrado, 2003**



**Fig. 4-19** Example of Weibull distributions for a mean wind speed  $v = 8$  m/s and different shape factors  $k$

## Ex: de curvas de distribuição de Rayleigh



Influência da velocidade média na distribuição de Rayleigh.

A função densidade de probabilidade de Rayleigh é a mais simplificada e fica definida apenas com o conhecimento da velocidade média. É mais adequada para representação de velocidades moderadas 4-8m/s.

É definida pela seguinte expressão:

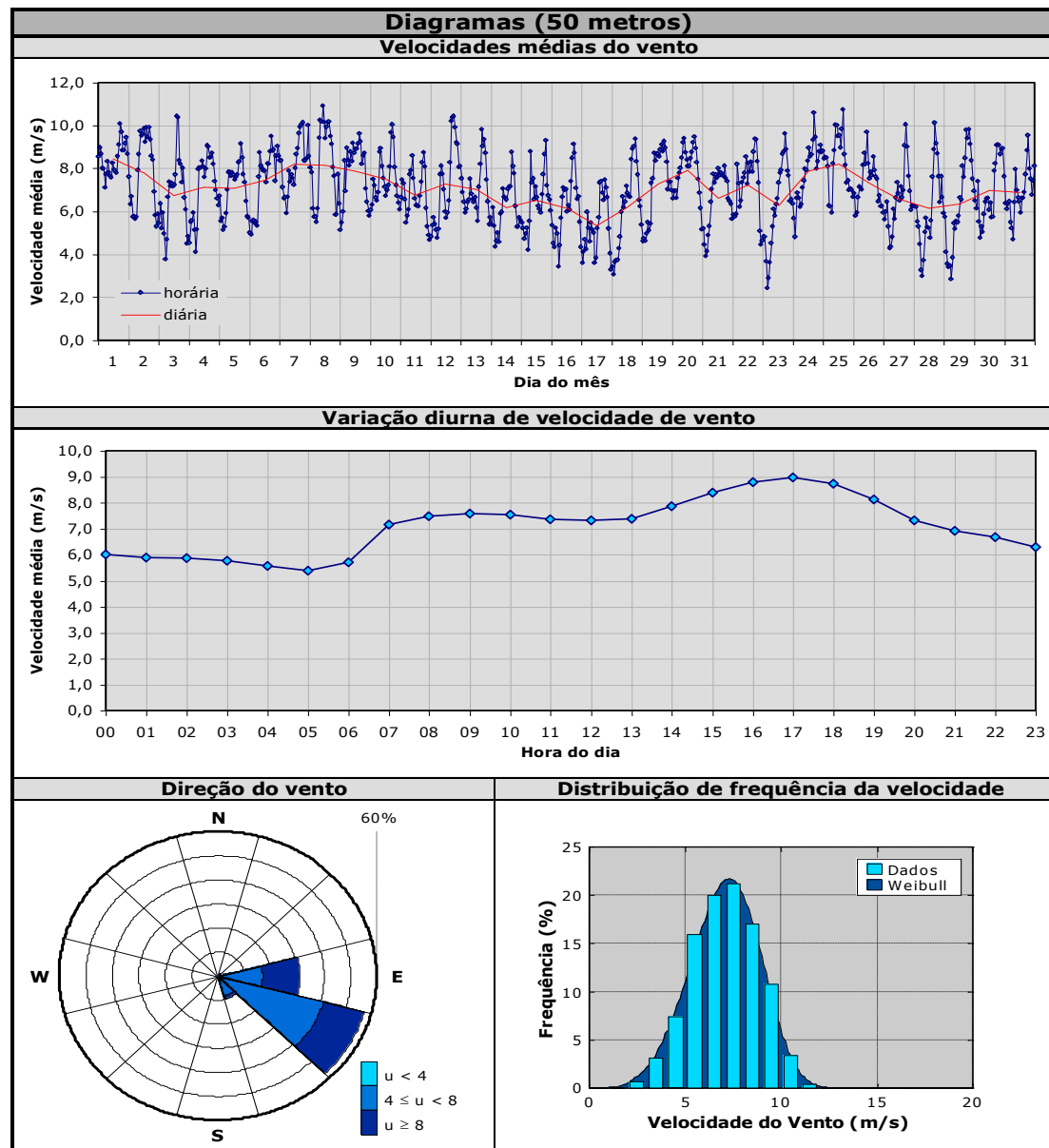
$$p(V) = \frac{\pi}{2} \frac{V}{\bar{V}^2} e \left[ -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{\bar{V}} \right)^2 \right]$$

Exemplo de  
Caracterização  
de potencial eólico

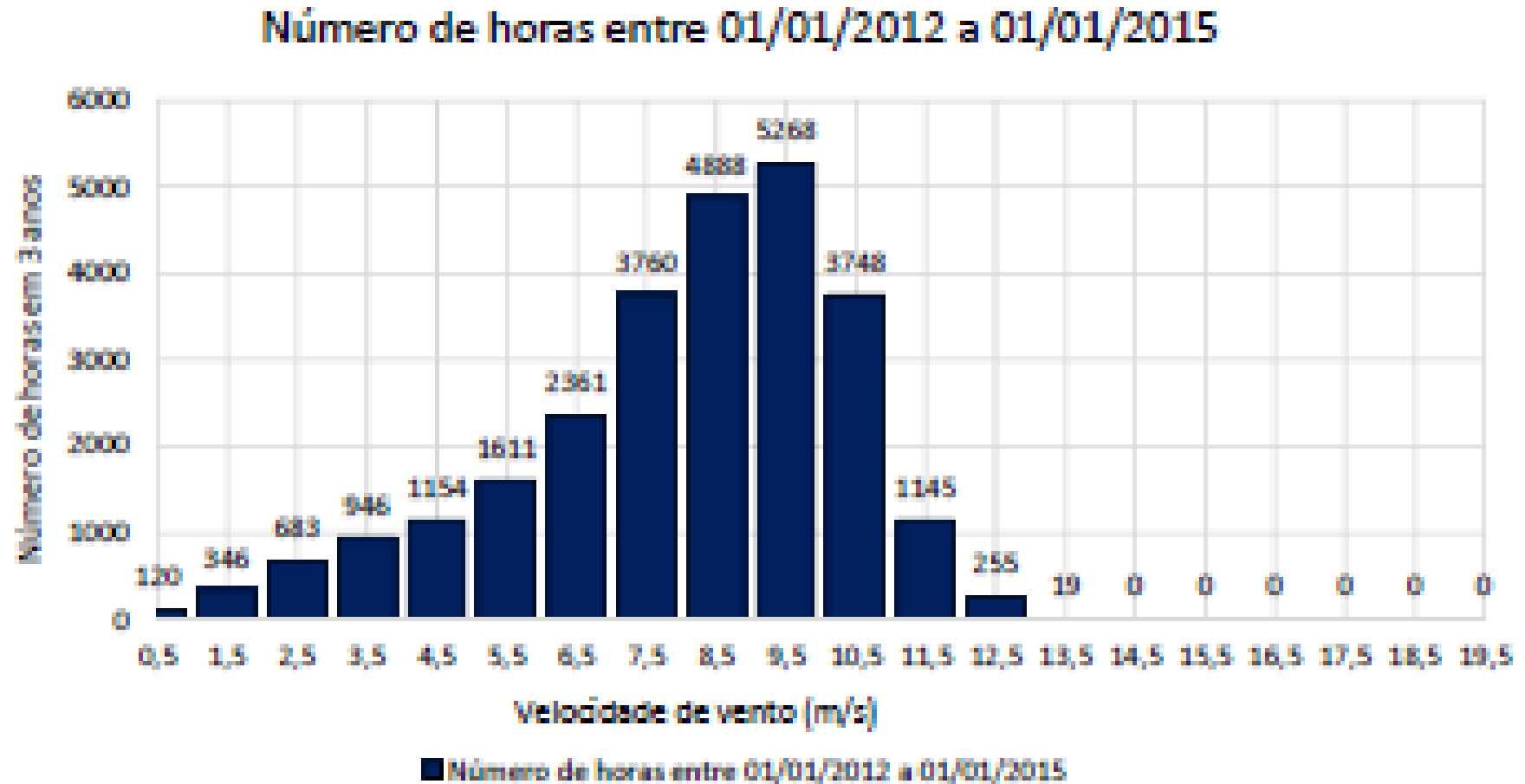
$$0.98/7.09 = 13.82$$

SUMÁRIO							
OUTUBRO 2003			Período analisado:		de	01/10/2003	
					a	31/10/2003	
Estação N°:		Latitude:		N° de registros:	4464		
Anemógrafo:	NRG9200P	Longitude:			Dados válidos:	100%	
Parâmetros de Vento Principais							
Velocidade média: Desvio padrão médio: Direção predominante: Intensidade de turbulência: Fator de forma de Weibull, k: Fator de escala de Weibull, c: Densidade de potência média: Expoente do gradiente vertical:	50 metros			30 metros			
	7,09 m/s			6,71 m/s			
	0,98			1,02			
	ESE (57,15%)			ESE (48,43%)			
	13,8%			15,2%			
	4,44			4,30			
	7,74 m/s			7,33 m/s			
	235,83 W/m²			202,06 W/m²			
			0,11				
Temperatura média do ar:		21,79 °C		Variação média (24h):		8,81 °C	
Informações Adicionais							
Velocidade de vento máxima	50 metros			30 metros			
	valor	dia	hora	valor	dia	hora	
	média diária (24h):	8,45 m/s	1	-	8,04 m/s	1	-
	média horária (1h):	10,92 m/s	8	11:00 h	10,36 m/s	8	11:00 h
	média do intervalo de 10min:	13,78 m/s	25	14:50 h	13,38 m/s	25	14:50 h
rajada (2s):	17,50 m/s	20	13:00 h	16,42 m/s	20	13:00 h	
Valores de temperatura extremos		máximo	dia	hora	mínimo	dia	hora
(intervalos de 10min):		28,66 °C	12	13:10 h	17,55 °C	11	04:50 h

# Exemplo de caracterização de potencial eólico

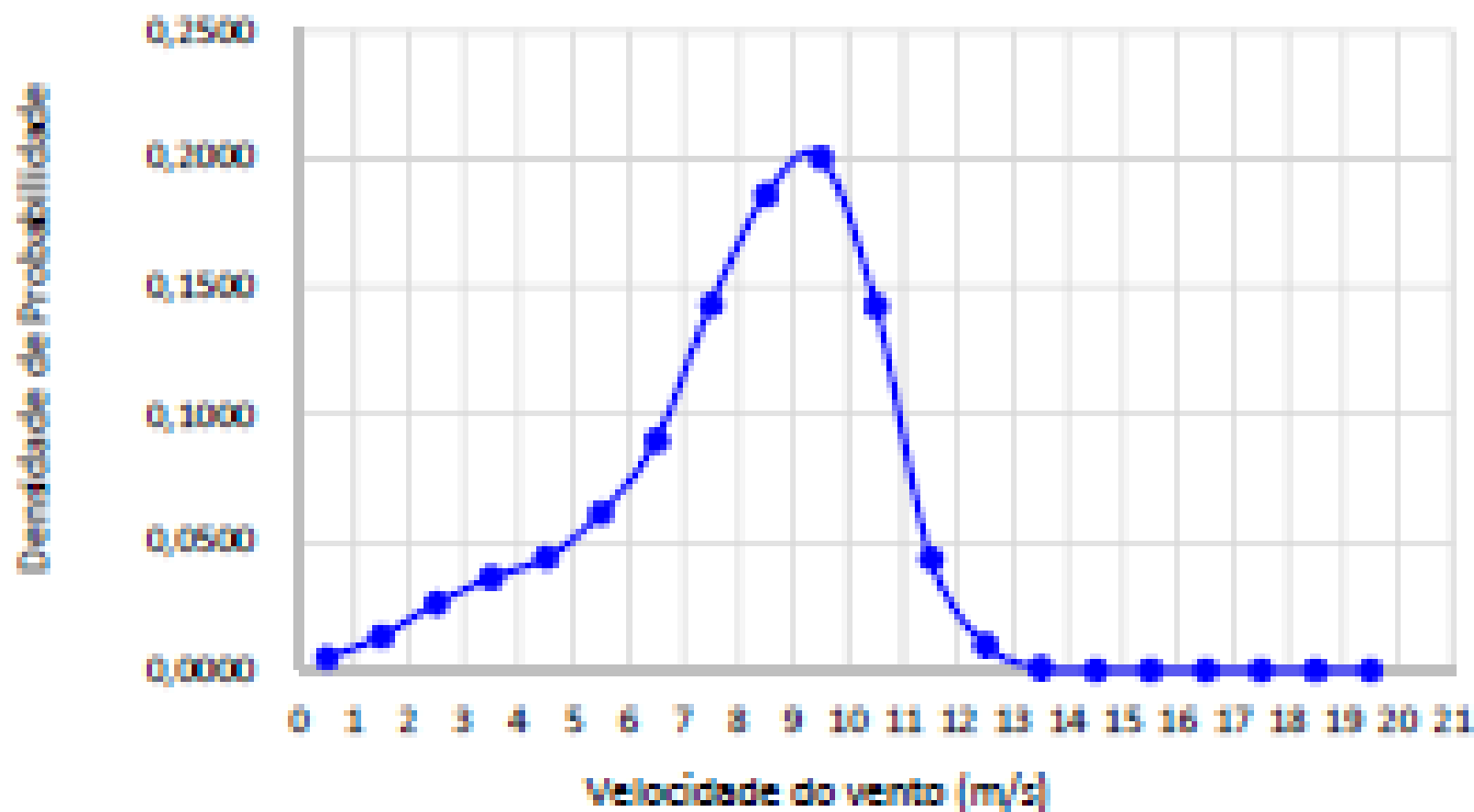


## Exemplo: dados do campo de La Guajira, Peru

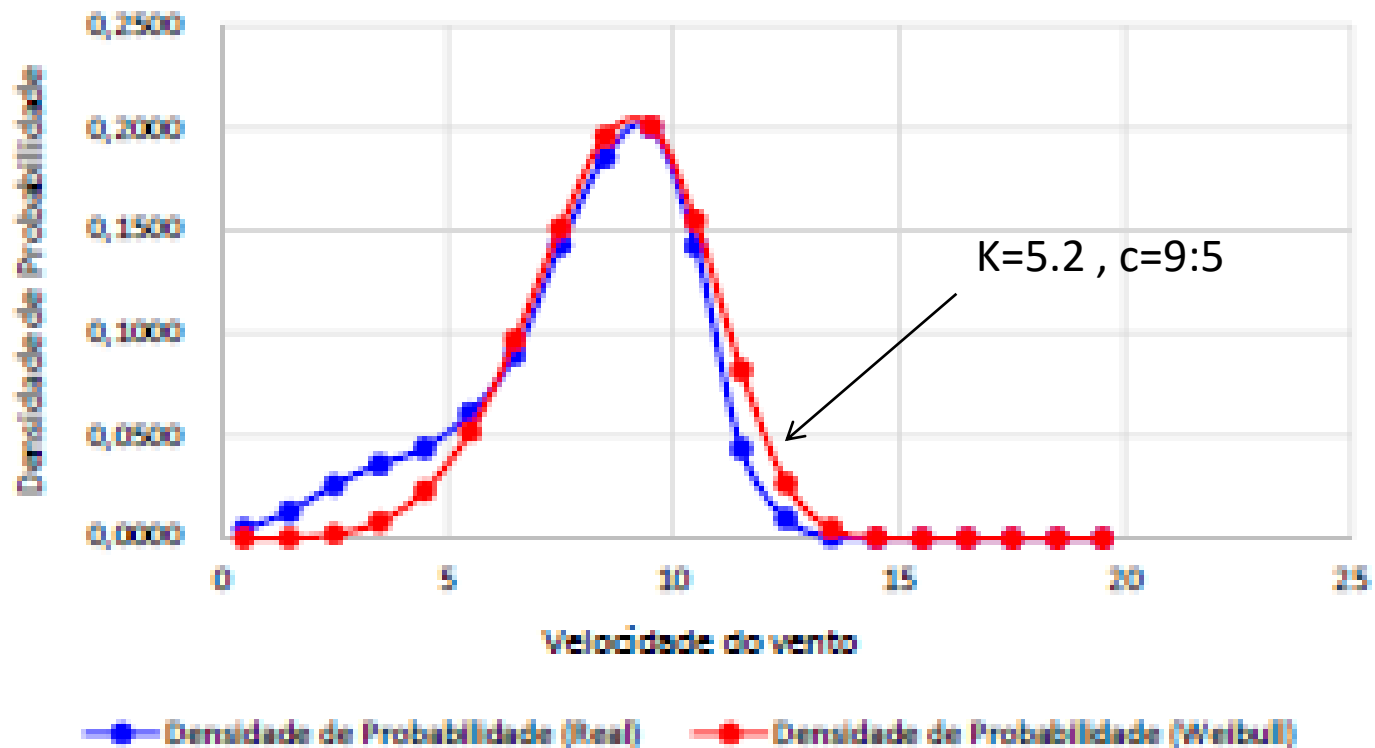




## Densidade de Probabilidade - Média 3 anos em La Guajira - Dados Reais



## Função Densidade - Real e Estimado com Weibull



Com o emprego da função Gama, que é tabelada, calcula-se a Média e o Desvio Padrão das velocidades, através das expressões\*:

$$\bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$$

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

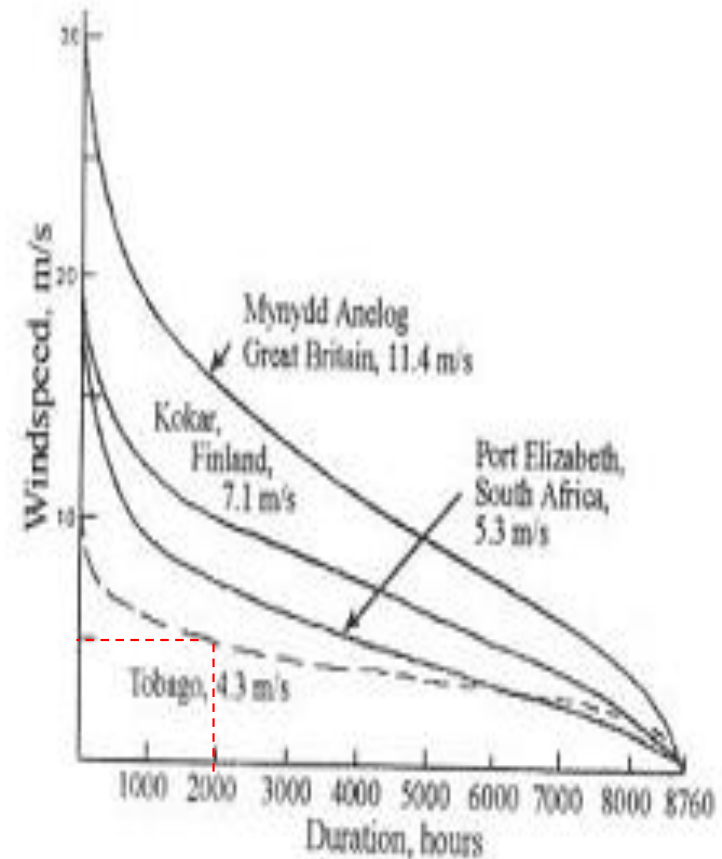
\* demonstração “por conta”

### 3- Curva de duração de velocidade e potência a partir dos dados

Curvas de duração de velocidade e potência podem ser úteis na comparação do potencial energético de locais candidatos para parques eólicos.

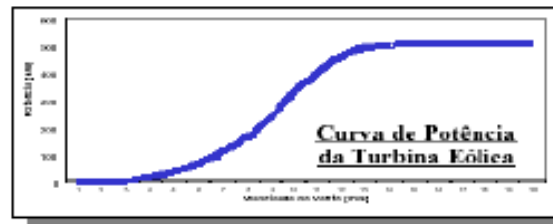
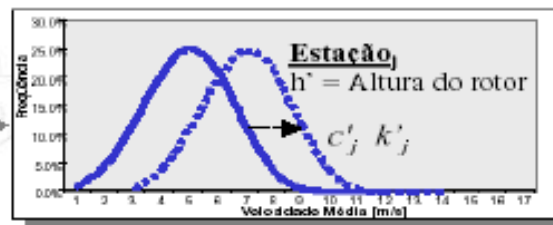
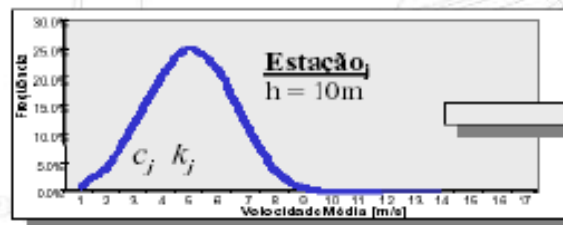
O eixo  $x$  representa o número de horas no período de medição de velocidades em que uma determinada velocidade é maior que um certo valor.

Por ex.: em Tobago,  $v \geq 5$  m/s em apenas 2000 das 8760 horas do período de medição (1 ano:  $365 \times 24$ h).



*Exemplo de curva de duração de velocidade para vários sítios, (Manwell, 2005)*

# Cálculo da Energia Produzida



Energia  
MWh/ano

$$p(v) = \left[ \frac{k}{c} \right] \times \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \times \exp \left[ \left( - \frac{v}{c} \right)^k \right]$$

Ex: Distribuição de Weibull

$$\frac{c}{\bar{v}} = (0.568 + 0.433/k)^{\frac{-1}{k}}$$

Fator de escala

$$k = \left( \frac{\sigma_u}{\bar{v}} \right)^{-1,086}$$

Fator de forma

$$EP(ano) = \sum fr_i \times P_i \times \Delta t$$

$$EP(ano) = \int p(v)P(v) \times \Delta t$$

## Variações na velocidade do vento

Velocidade do vento (m/s)	Frequência de ocorrência (%)	Potência do aerogerador (KW)	F(v), P(v)
1	0,474	0	0,0
2	1,436	2	0,0
3	4,017	16	0,7
4	7,149	56	4,0
5	10,466	127	13,3
6	12,855	240	30,9
7	13,617	400	54,5
8	13,040	626	81,6
9	11,597	892	103,4
10	8,097	1223	108,9
11	6,144	1590	97,7
12	3,942	1830	72,1
13	2,797	1950	54,5
14	1,674	2050	34,3
15	0,885	2050	18,1
16	0,453	2050	9,3
17	0,268	2050	5,5
18	0,153	2050	3,1
19	0,091	2050	1,9
20	0,022	2050	0,5
21	0,002	2050	0,0
22	0,002	2050	0,0
23	0,004	2050	0,1
24	0,000	2050	0,0
25	0,000	2050	0,0
Total			694,6

$$0,11597 \times 892 = 103,4$$

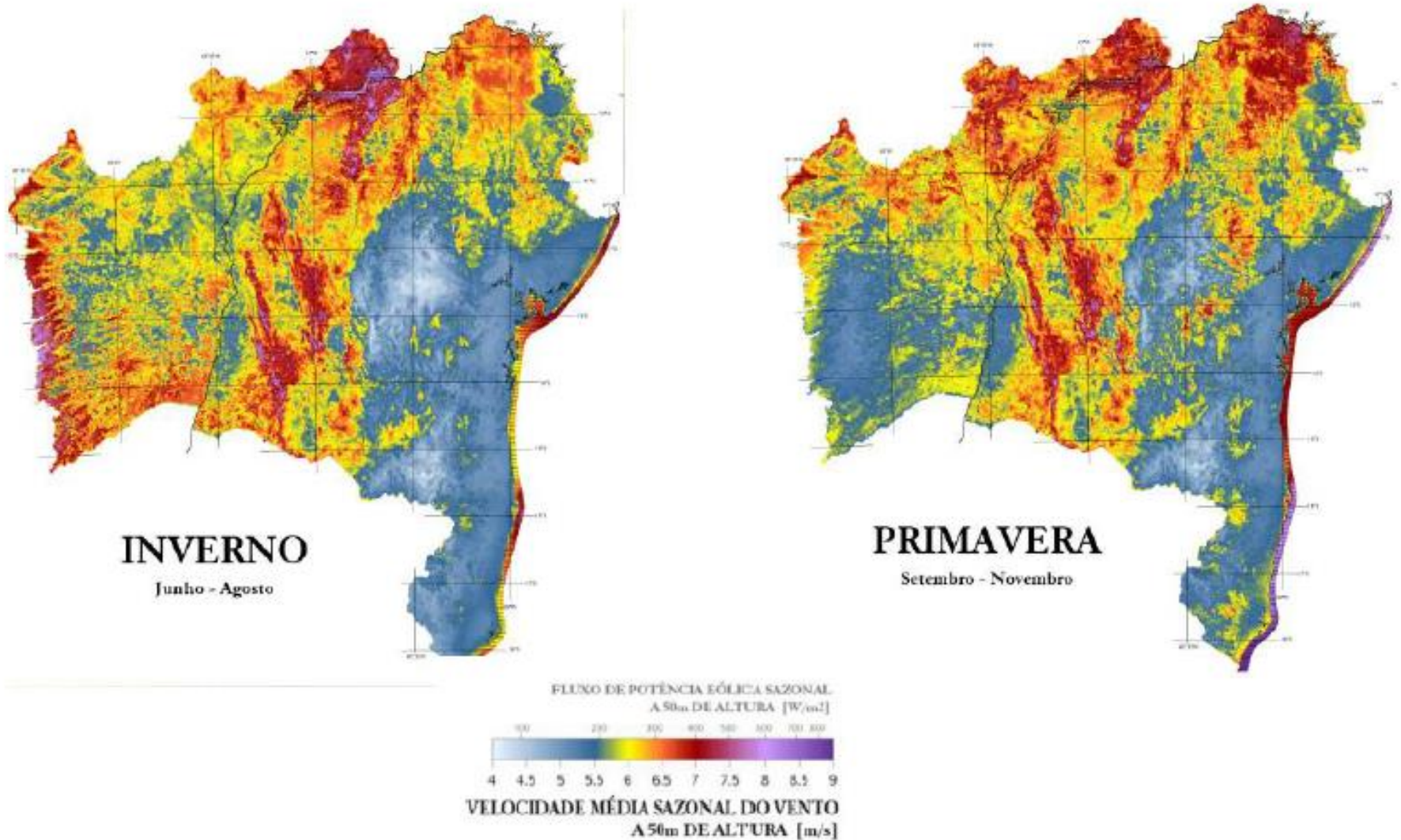
$$EP(ano) = \sum fr_i \times P_i \times \Delta t$$

$$EP(ano) = 694,6 \times 8760h/ano$$

$$= 6085 \text{ MWh}$$

Exemplos:

## Mapa eólico Bahia - sazonal







## Ex.: Dados do CRESESB

### Dados de Vento

Latitude: 21,190833° S  
Longitude: 50,512222° O

Atlas do Potencial Eólico Brasileiro		Dados de vento a 50 m de Altura				
Grandeza	Unidade	Dez-Fev	Mar-Mai	Jun-Ago	Set-Nov	Anual
velocidade média do vento	m/s	4,28	5,58	6,31	6,26	5,61
fator c		4,83	6,3	7,11	7,06	6,33
fator k		2,24	2,02	2,51	1,92	2,04
densidade de potência	W/m²	83	201	242	299	206

$k=2.04$

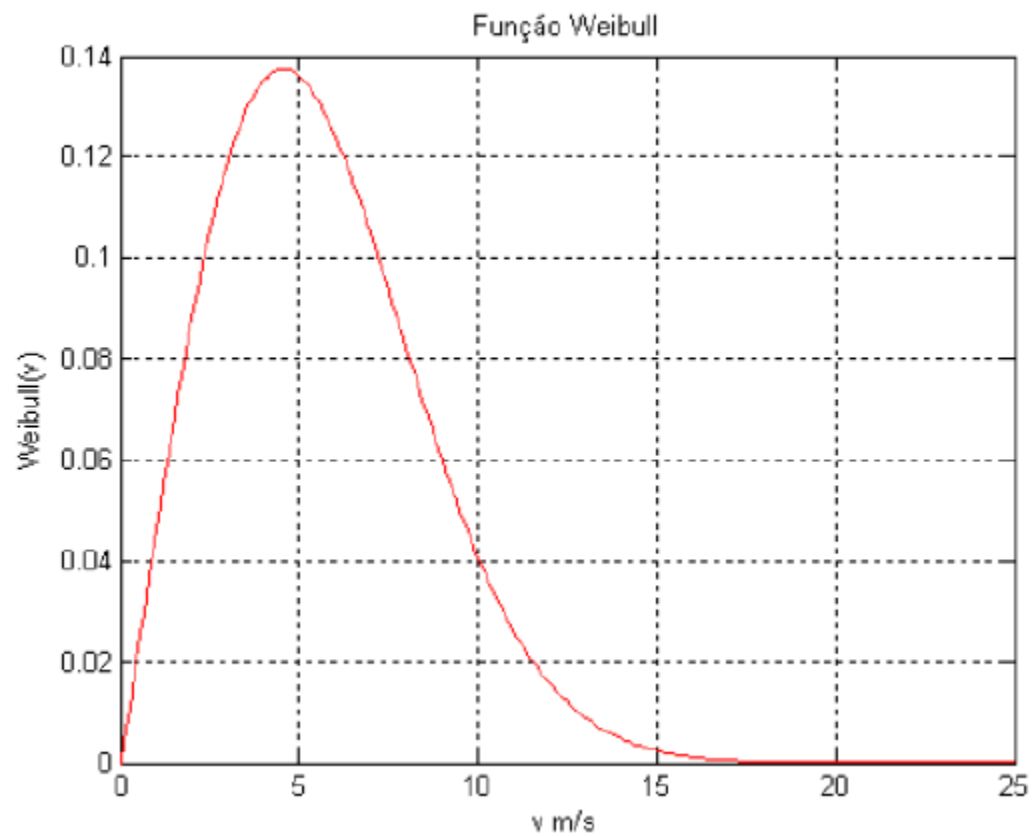
$c=6.33$

$v=0:0.1:25;$

$F=(k/c) * (v/c) . ^{(k-1)} . * \exp(-(v/c) . ^k);$

### Comandos Matlab

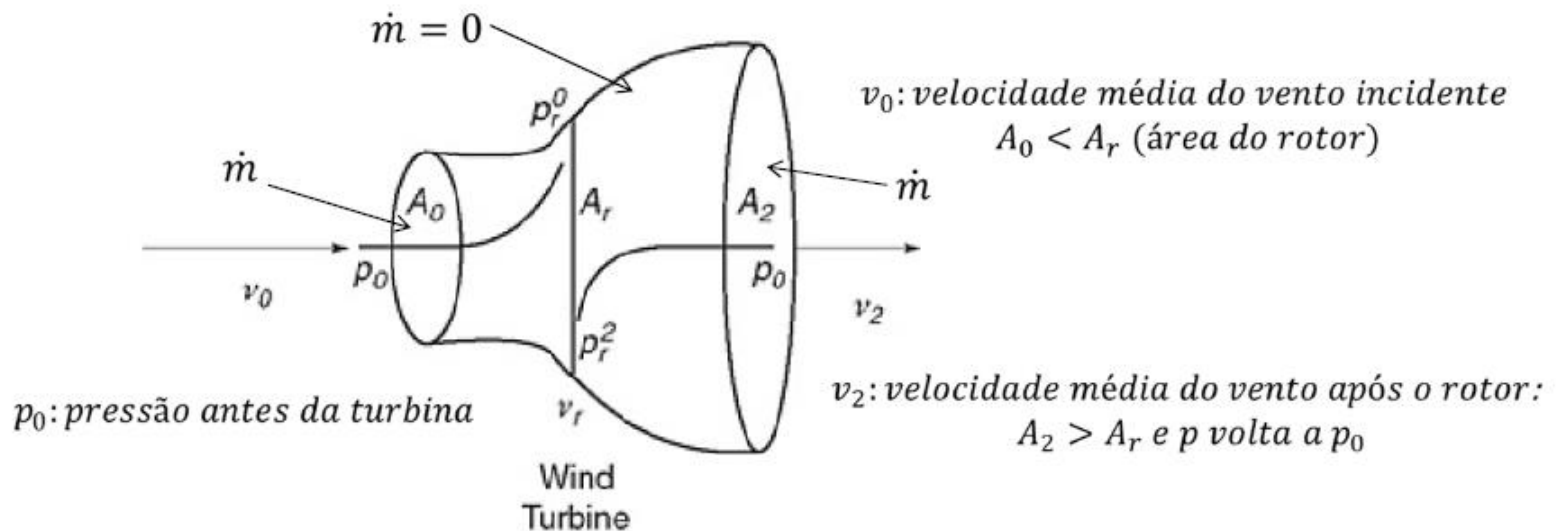
```
plot(v, F, 'r-')  
xlabel('v m/s');  
ylabel('Weibull(v)');  
title('Função Weibull');  
grid on
```



CONVERSÃO DE ENERGIA

EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO

## Dedução da Lei de Betz (máxima potência teórica)



Força atuante sobre o disco do rotor

$$F_E = \dot{m} \Delta v = \dot{m}(v_0 - v_2) \left[ \frac{kg}{s} \right] \left[ \frac{m}{s} \right], \text{ ou } \left[ \frac{kg \cdot m}{s^2} \right] : \text{Newton} \quad (1)$$

$$P_{ot} = \underbrace{\frac{1}{2} \rho A_r v_0^3}_{\text{Pot. disponível}}$$

$$P_{ot} = F_E v_r = \dot{m}(v_0 - v_2) v_r \quad (2)$$

$$P_{ot} : \frac{[kg][m^2][m^3]}{[m^3][s^3]} = \frac{[kg][m^2]}{[s^2]} \Big/ [s] = \frac{\text{Joule}}{s} : \text{Watt}$$

$$P_{ot} = \frac{dE_{cin}}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta E_{cin}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[ \frac{1}{2} \frac{\Delta m}{\Delta t} (v_0^2 - v_2^2) \right] \rightarrow P_{ot} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_0^2 - v_2^2) \quad (3)$$

Igualando (2) e (3):

$$\frac{1}{2} \dot{m} (v_0^2 - v_2^2) = \dot{m} (v_0 - v_2) v_r \rightarrow$$

$$v_r = \frac{1}{2} (v_0 + v_2) \quad (4)$$

A velocidade do vento que passa pelo rotor é a média entre a velocidade antes e depois da turbina

Já vimos que  $\dot{m} = \rho v_r A_r$ , logo, de (2):

$$P_{ot} = \dot{m} (v_0 - v_2) v_r \rightarrow P_{ot} = \rho A_r (v_0 - v_2) v_r^2 \quad (5)$$

De (4) vem:  $v_2 = 2v_r - v_0$ ; substituindo em (5):

$$P_{ot} = 2 \rho A_r v_r^2 (v_0 - v_r) \quad (6)$$

Fator de interferência ou de perturbação:

$$\alpha = \frac{\Delta v}{v_0} = \frac{v_0 - v_r}{v_0} \rightarrow v_r = (1 - \alpha)v_0 \quad (7)$$

Obs.  $\alpha$  também é denominado fator de indução axial

Como  $v_r = \frac{1}{2}(v_0 + v_2)$ , resulta  $\alpha = \frac{v_0 - v_2}{2v_0} \quad (8).$

Substituindo (7) em (6), resulta:

$$P_{ot} = 2 \rho A_r (1 - \alpha)^2 v_0^2 [v_0 - (1 - \alpha)v_0] \rightarrow$$

$$P_{ot} = \underbrace{\frac{1}{2} \rho A_r v_0^3}_{Pot. disponível} \underbrace{[4\alpha(1 - \alpha)^2]}_{C_P}$$

Define-se  $C_P = \frac{Pot. extraída}{Pot. disponível} = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad (9)$

Qual o máximo  $C_p$  ?

$$\frac{\partial C_p}{\partial \alpha} = 0 \rightarrow 4(1 - \alpha)^2 + 4\alpha^2(1 - \alpha)(-1) = 0 \rightarrow$$

$$\alpha = \frac{1}{3}$$

$$\text{Portanto, } C_{p\text{máx}} = 4\frac{1}{3}\left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} \approx 0,59$$

Os valores correspondentes das velocidades são:

$$v_r = \frac{2}{3}v_0 \text{ e } v_2 = \frac{1}{3}v_0 .$$

Outra maneira de apresentar os resultados bastante empregada resulta da substituição de  $\alpha = \frac{v_0 - v_2}{2v_0}$  (8) em

$$C_P = 4\alpha(1 - \alpha)^2, \text{ resultando}$$

$$C_P = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v_2}{v_0} \right) \left( 1 - \frac{v_2^2}{v_0^2} \right), \text{ ou,}$$

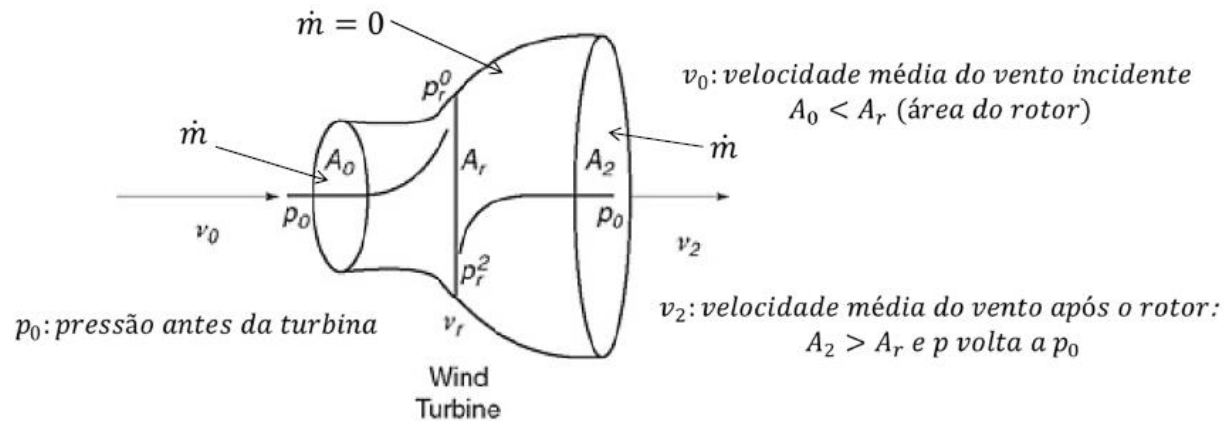
$$C_P = \frac{1}{2} (1 + r_v) (1 - r_v^2), \text{ onde } r_v = \frac{v_2}{v_0}$$



# Curva de $C_p$ máximo (teórico) em função da velocidade do vento

$$\text{Máximo } C_p \text{ (teórico)} = 16/27 = 59,26\%$$

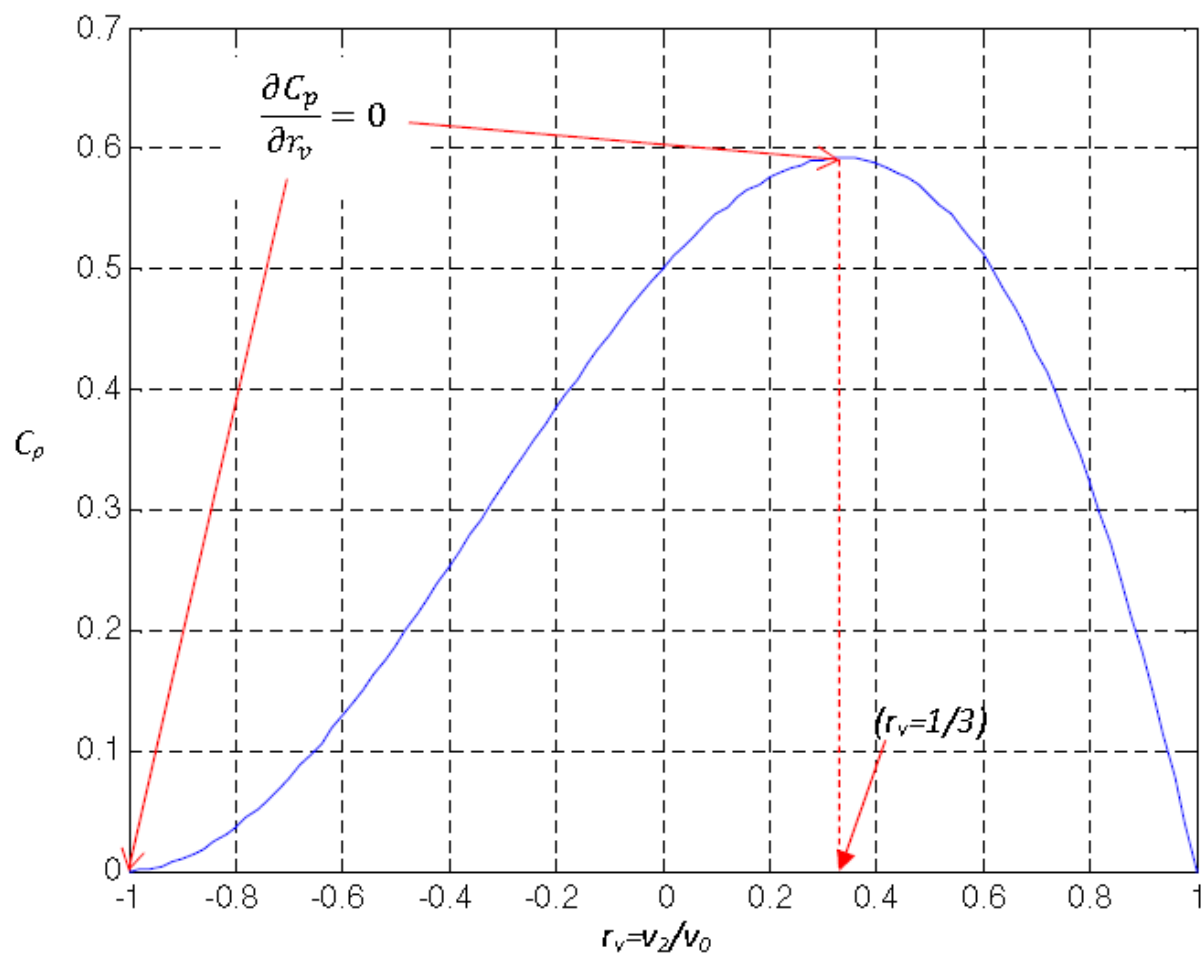
└─ *Eficiência de Betz*



Na prática  $C_p$  é menor que o valor máximo teórico em função de vários fatores:

- efeito da esteira atrás do rotor
- número de pás e perdas na ponta associadas (área varrida real < geométrica)
- força de arrasto
- perfil aerodinâmico das pás

Curva de  $C_p$  máximo (teórico) em função da razão de velocidades  $v_2/v_0$



## Exemplos de tentativas de aumentar o aproveitamento da potência disponível

### GE cria escudos gigantes para aumentar eficiência em turbinas eólicas

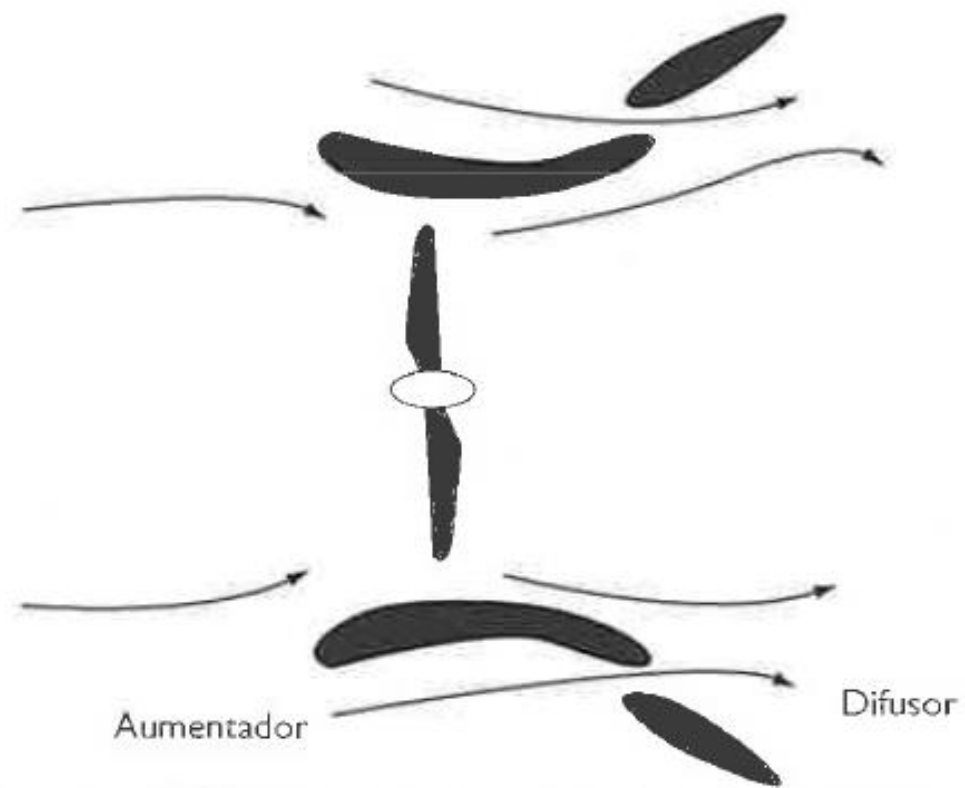
Gabriel Silva – INFO – 08/06/2015



Escudo de 9 ton.

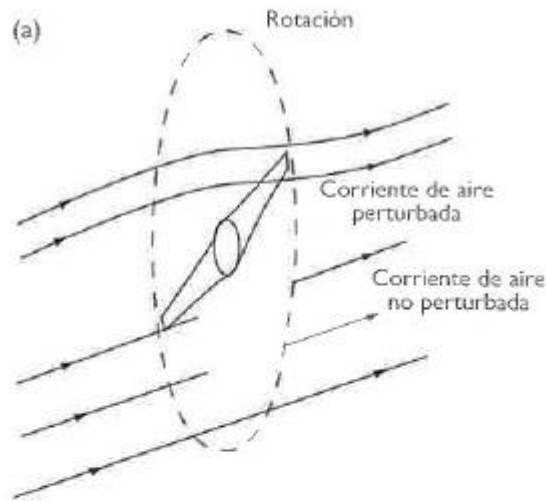
Ao redirecionar o vento que bate na turbina, os domos aumentam em 3% a eficiência energética do sistema

## Concentrador de vento

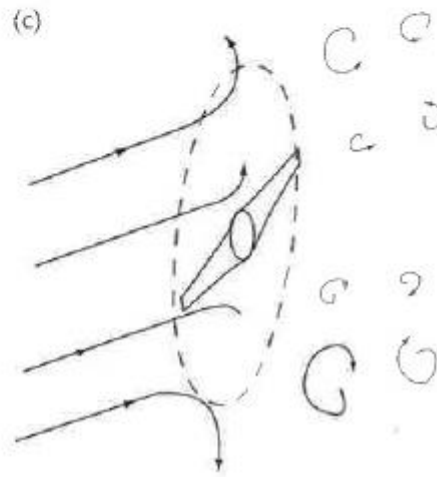
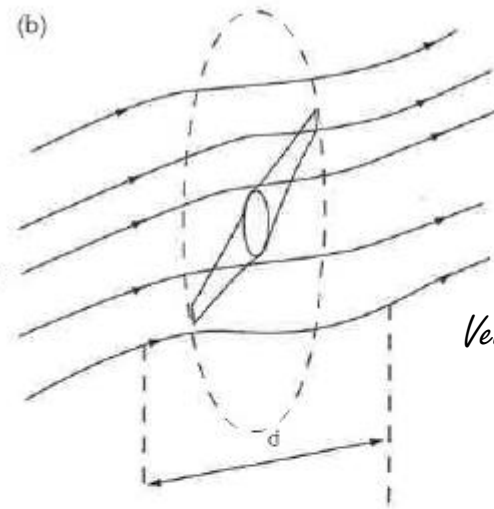


# Influência da Velocidade de Rotação

*Velocidade de rotação  
abaixo da ideal*



*Velocidade de rotação ideal*



*Velocidade de rotação  
acima da ideal*

## **INFLUÊNCIA DA ROTAÇÃO DA ESTEIRA FORMADA PELO ROTOR**



**Interferência da esteira; depende da velocidade de ponta de pá**

## Efeito das diversas fontes de perda de potência

