

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### **Introducción:**

El factor crítico de la conversión de la energía del viento es su velocidad: la conversión de potencia se relaciona mediante la velocidad al cubo...

El viento es un fenómeno estocástico por naturaleza: su dirección y velocidad en cualquier lugar varían aleatoriamente en el tiempo: día a día, estación a estación, año a año....

Un dato elemental es la velocidad promedio del viento...., se puede decir que 7 m/s ya es apropiado....pero también es importante su distribución estadística... y por lo tanto su modelado estadísticos....

El potencial energético dependerá entonces de la velocidad del viento y su distribución estadística

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Introducción:

Cuanta energía por unidad de área está disponible para el rotor???

Algunos factores de interés:

- ◆ Porcentaje del tiempo que se dispone de velocidad de viento aprovechable
- ◆ Velocidad del viento más frecuente
- ◆ Coincidencia de la velocidad del viento con el máximo aprovechamiento energético

Los vientos extremos determinan las condiciones estructurales

Se describirán a continuación los modelos estadísticos usados para el análisis de este recurso indicando su aplicación en la conversión de la energía del viento como así también los métodos e índices para cuantificar el potencial energético de determinado régimen de viento

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

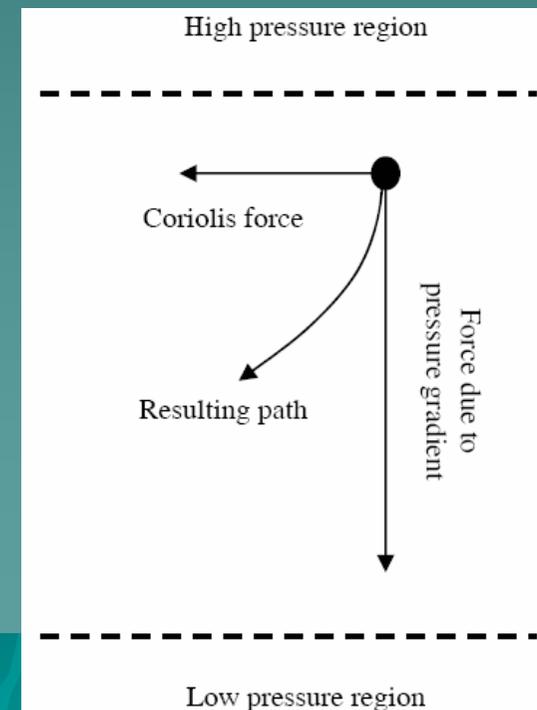
## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento:

El origen del viento también se debe a la radiación solar....una diferencia de presión originada en las diferentes temperaturas de la superficie de la tierra y por ende del aire

Este viento es el dominante y se le denomina “viento geotrópico” o “viento global” y es típico de elevadas altitudes

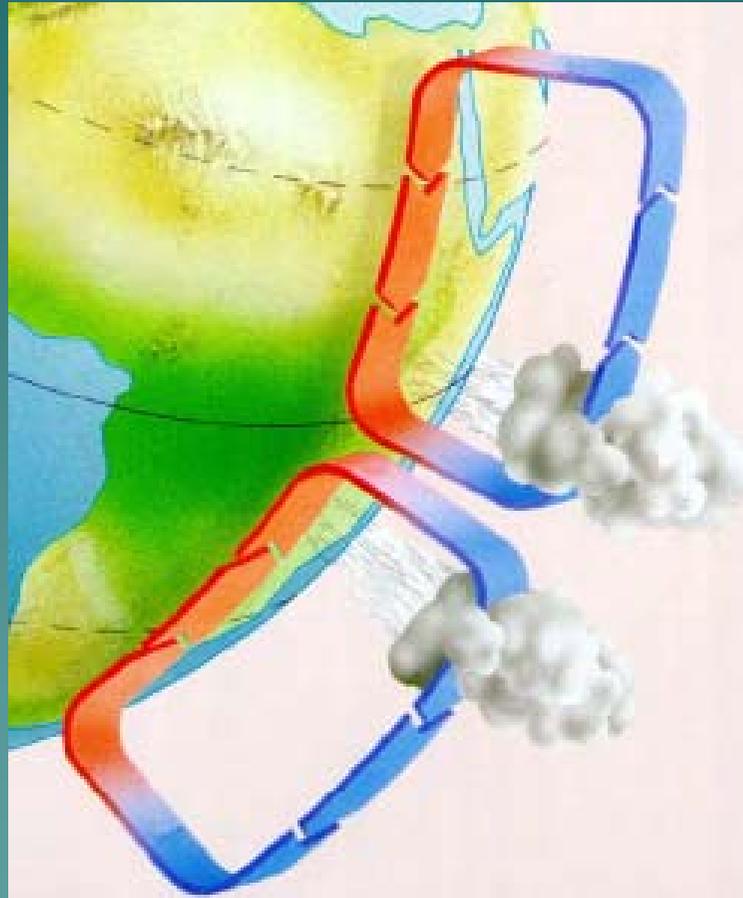
La rotación de la tierra introduce otra componente  
En la dirección del viento (efecto Coriolis)  
Por ello los vientos en el hemisferio norte  
tienden a girar en sentido horario  
mientras en el sur en sentido antihorario



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

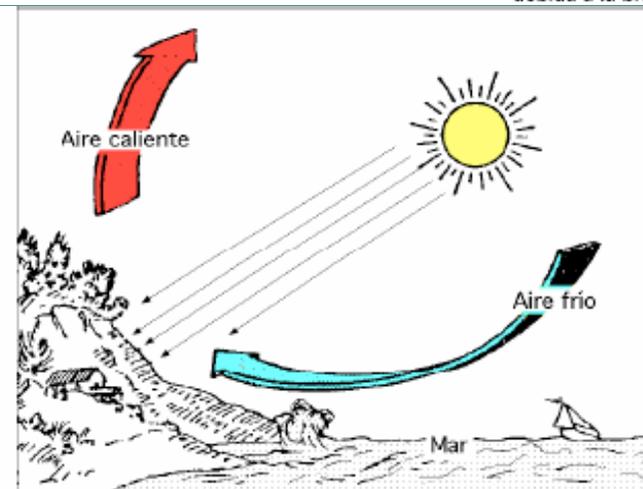
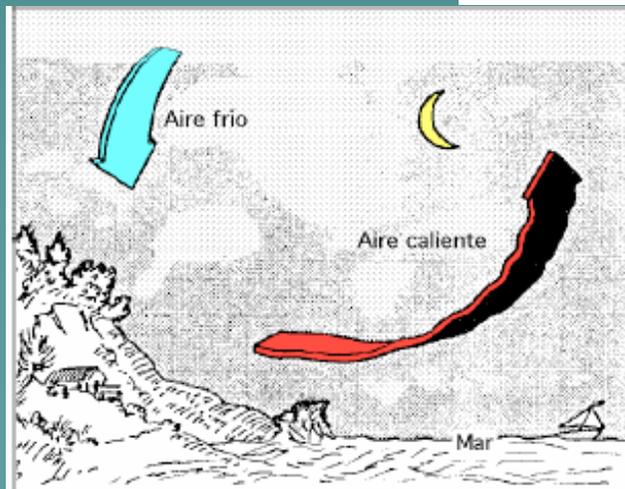
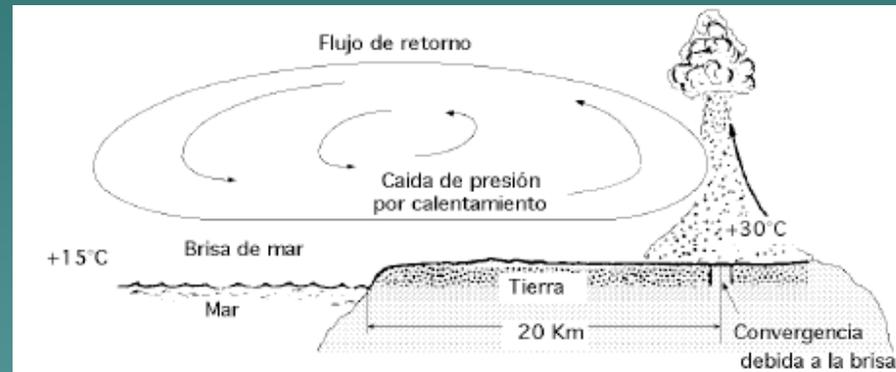
## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Efecto local:**

Los vientos próximos a la superficie de la tierra (~100m) son los de mayor interés ya que esa es la zona “aprovechable” (en esta zona el viento es muy influenciado por factores locales)

Brisas costeras



*Brisas de mar*

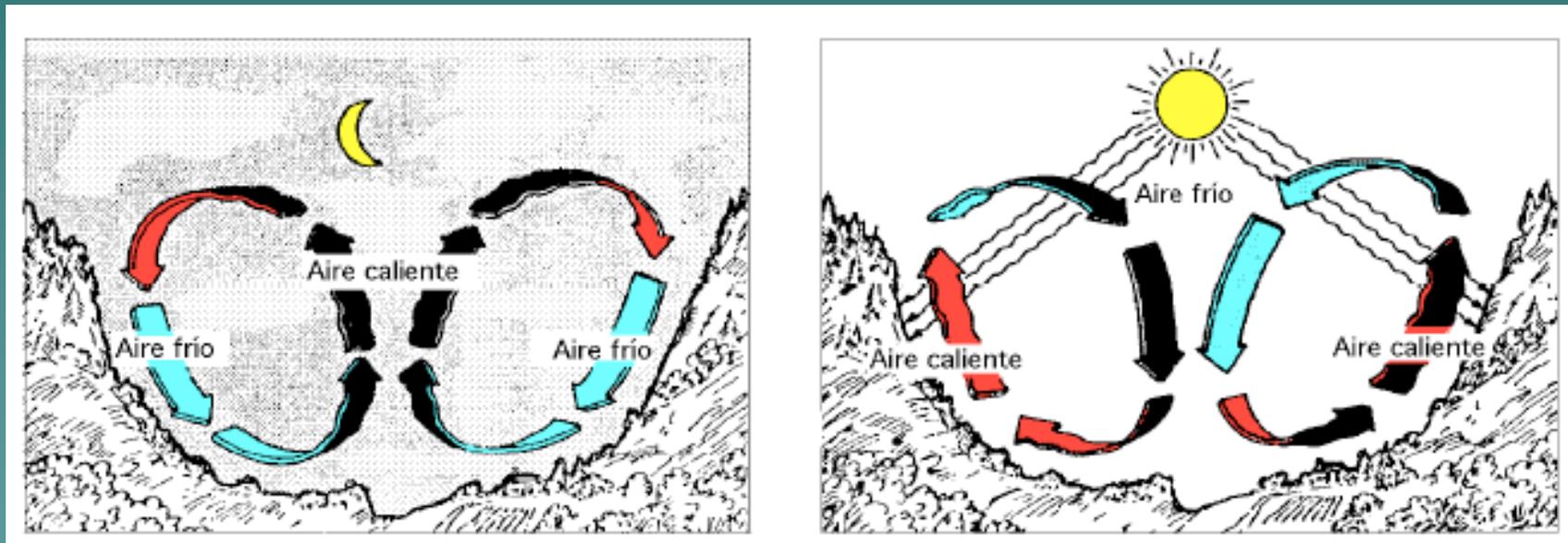
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Efecto local:**

Vientos entre montañas y valles



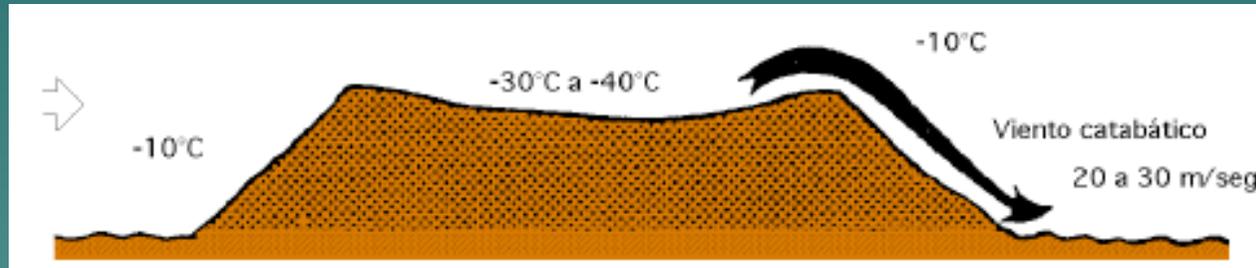
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

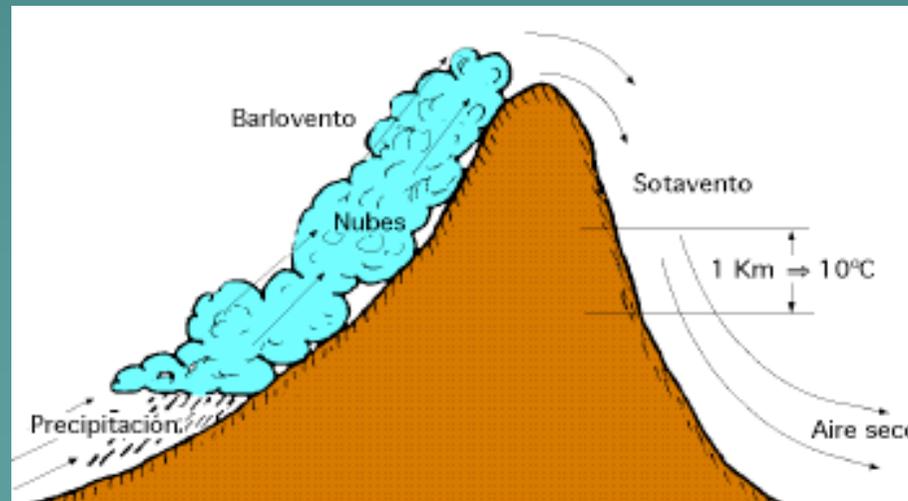
**El viento:**

**Efecto local:**

Vientos catabáticos o anabáticos



Fohn



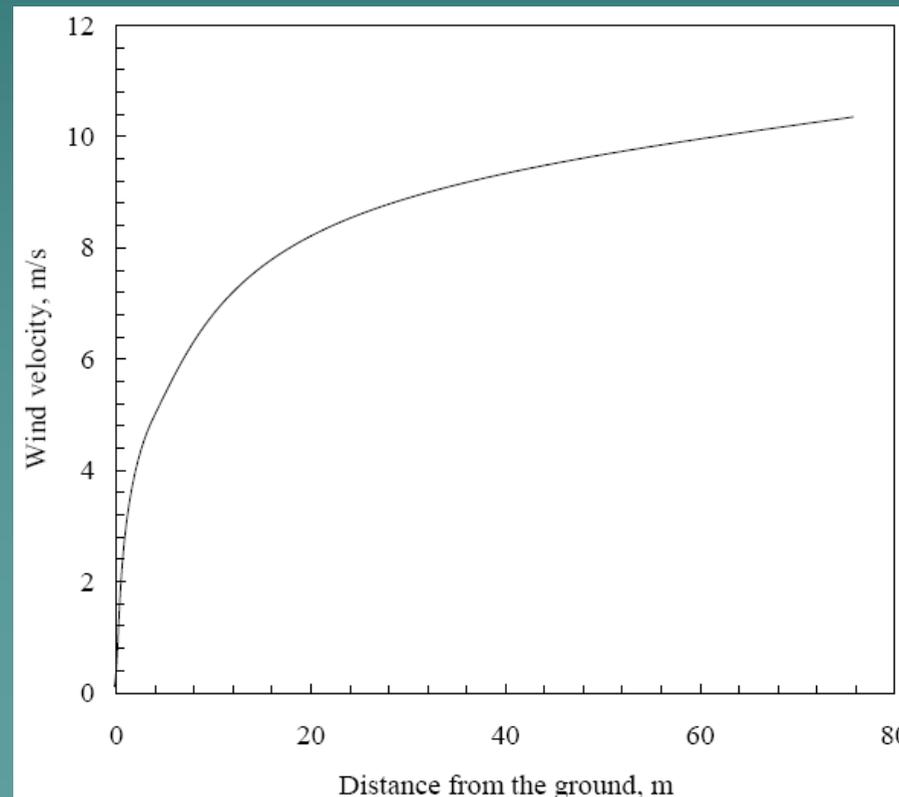
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Cizalladura del viento:**

Efecto capa límite: la resistencia se origina en la misma rugosidad del terreno, vegetación, construcciones, etc



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Cizalladura del viento:**

La tasa de incremento de la velocidad con la altura depende de la rugosidad del terreno

Se habla de *clase de rugosidad* o *altura de rugosidad*; ejemplos

0,005 para terrenos planos

0,025-0,1 para terrenos con gramíneas o pastos bajos

.....1-2 para bosques, selvas o centros de torres urbanas...

La altura de rugosidad es un factor importante en el diseño de plantas de energía eólica; basta suponer una turbina de viento de 100 m de diámetro montada sobre una torre de 85 m en un lugar donde el perfil del viento es como el mostrado en la figura anterior.....

Cual sería la solución a tal problema????

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Cizalladura del viento:**

Esto manifiesta la necesidad de disponer de datos de viento a diferentes alturas respecto del nivel de la superficie (cada 10 m de diferencia de altura al menos)

Interesa la velocidad disponible del viento a la altura del rotor. Con algunos datos medidos y la altura de rugosidad se pueden interpolar o extrapolar valores

El modelo que describe la variación del viento con la altura es aproximadamente logarítmico; si se conoce el dato de viento a una altura  $Z$  y se conoce la altura de rugosidad  $Z_0$ , la velocidad a una altura  $Z_R$  puede estimarse mediante:

$$U(Z_R) = U(Z) \frac{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Cizalladura del viento:**

En ciertos casos se dispone de datos en algún punto recolectado por una estación meteorológica. Tal dato puede transformarse a una altura diferente en otra localización con similar perfil de viento pero con diferente altura de rugosidad. Es razonable suponer que la velocidad del viento no se ve significativamente afectada por las características de superficie por encima de cierta altura ( se supone 60 m). En el punto donde se ha medido, y si la altura de rugosidad en tal punto es  $Z_{OR}$ , se puede decir que:

$$U(60) = U(Z_R) \frac{\ln\left(\frac{60}{Z_{OR}}\right)}{\ln\left(\frac{Z_R}{Z_{OR}}\right)} \quad \text{En otra localización: } U(60) = U(Z) \frac{\ln\left(\frac{60}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}$$

Dividiendo las anteriores:

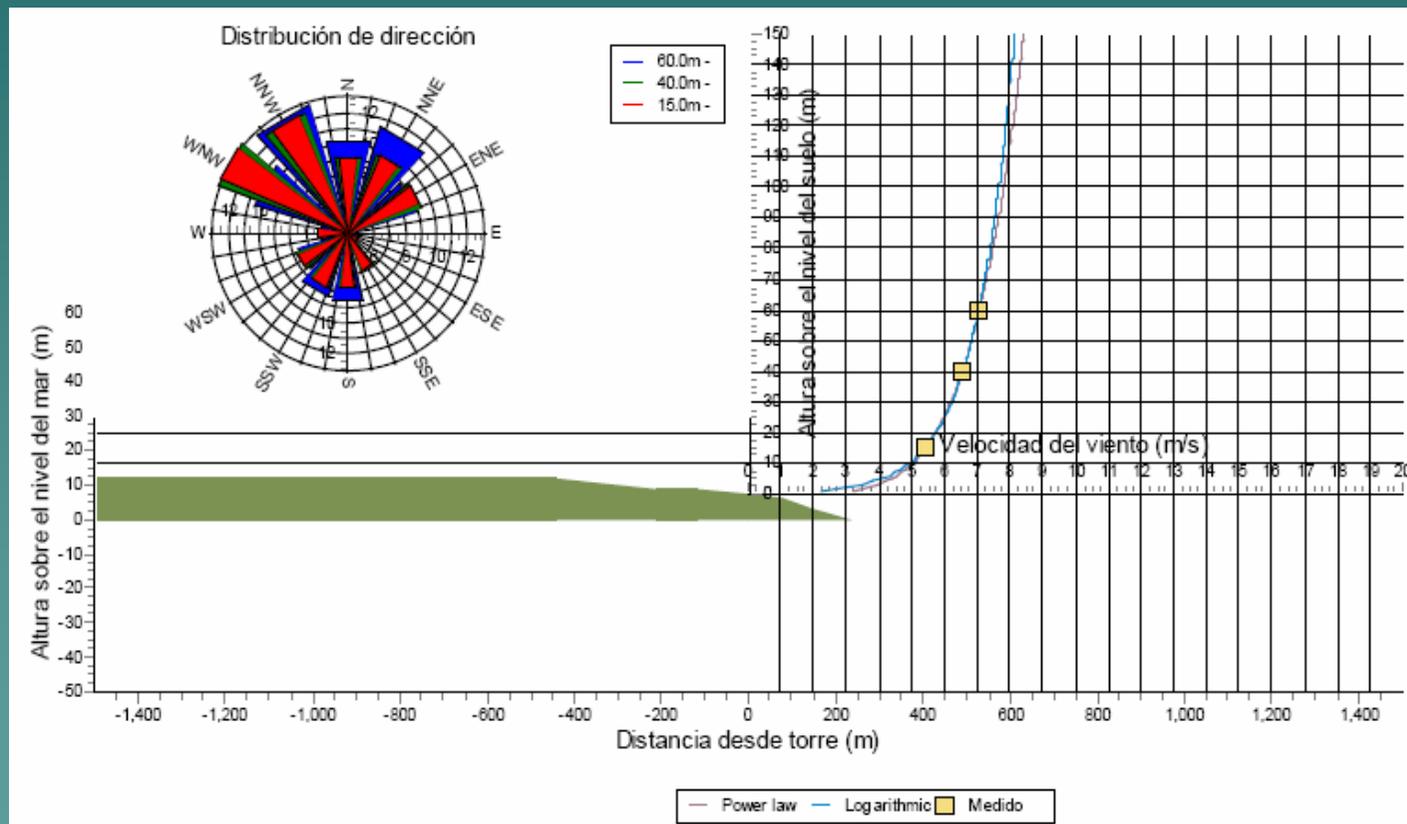
$$U(Z) = U(Z_R) \left( \frac{\ln\left(\frac{60}{Z_{OR}}\right) \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{60}{Z_0}\right) \ln\left(\frac{Z_R}{Z_{OR}}\right)} \right)$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

El viento:

Cizalladura del viento:

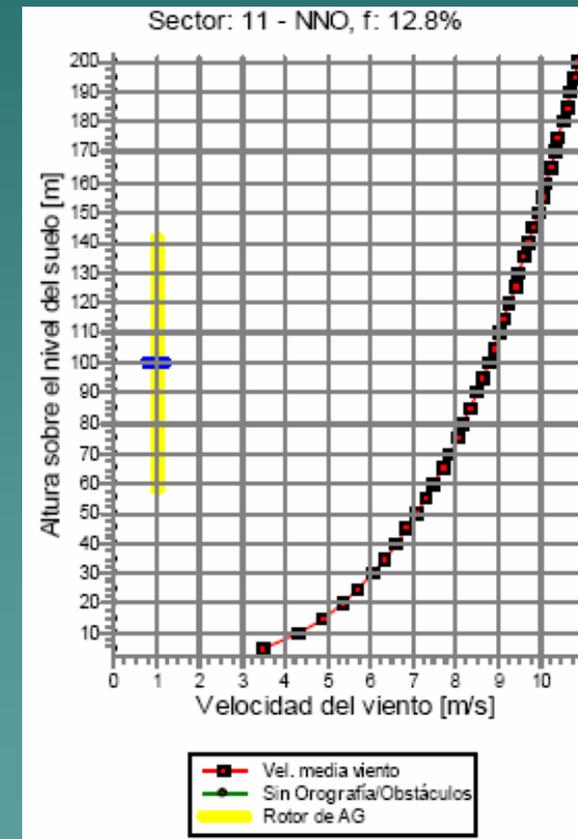
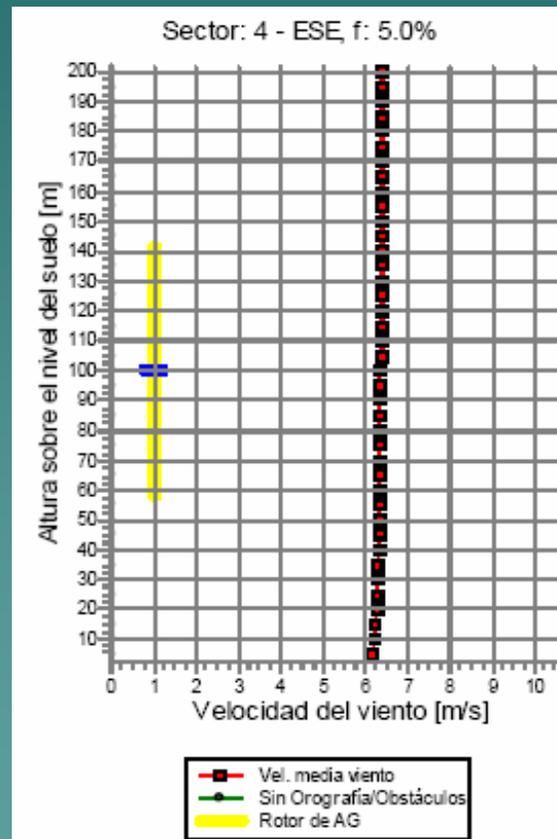
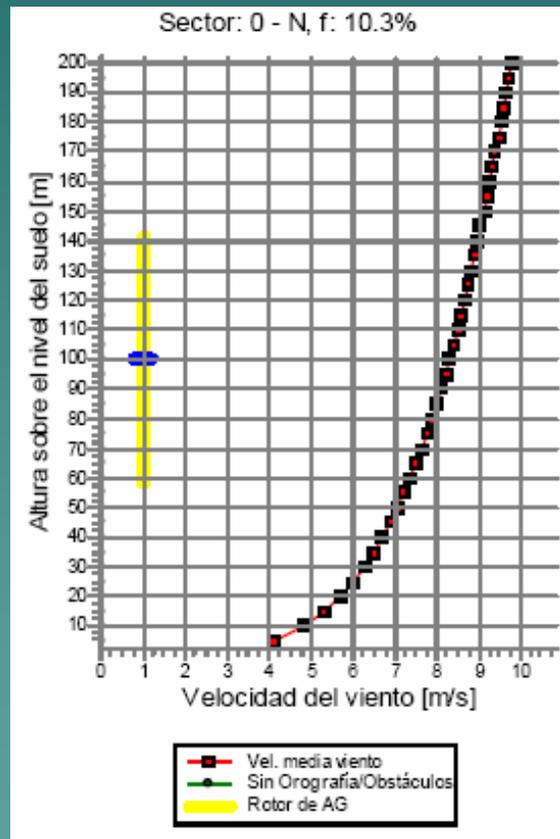


# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

El viento:

Cizalladura del viento: Casos medidos



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Turbulencia:**

La turbulencia en el viento es causada por disipación de la energía cinética en energía térmica creando y destruyendo progresivamente pequeños remolinos o ráfagas.

Una manera de cuantificar la turbulencia es mediante la *Intensidad de Turbulencia (TI)*: es la relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento y su valor promedio:

$$TI = \frac{\sigma_U}{U} \quad U = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N_s} u_i \quad \sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N_s - 1} \sum_{i=1}^{N_s} (u_i - U)^2}$$

Típicos *TI* oscilan entre 0,1 y 0,4

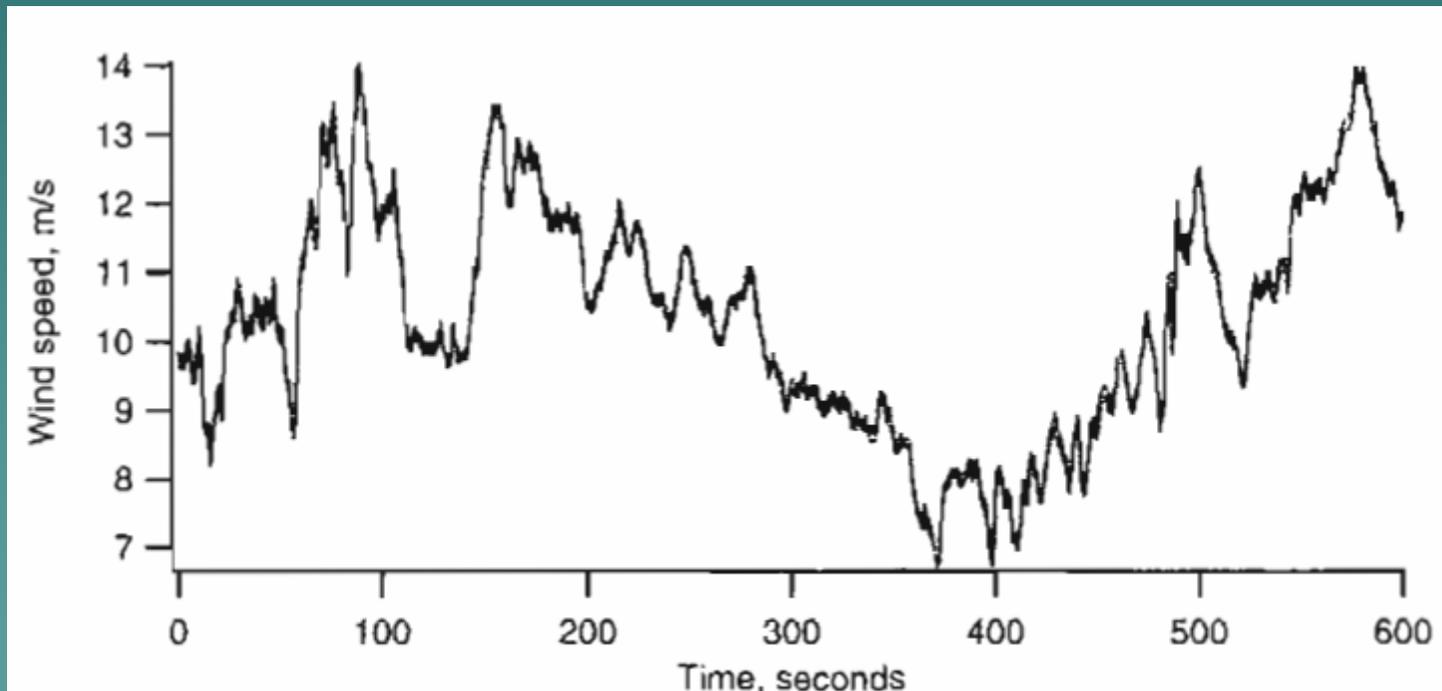
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Turbulencia:**

Muestreo a 8Hz, valor medio 10.4 m/s, desviación estándar 1.63 m/s, la intensidad de turbulencia para el período de 10 minutos es 0.16



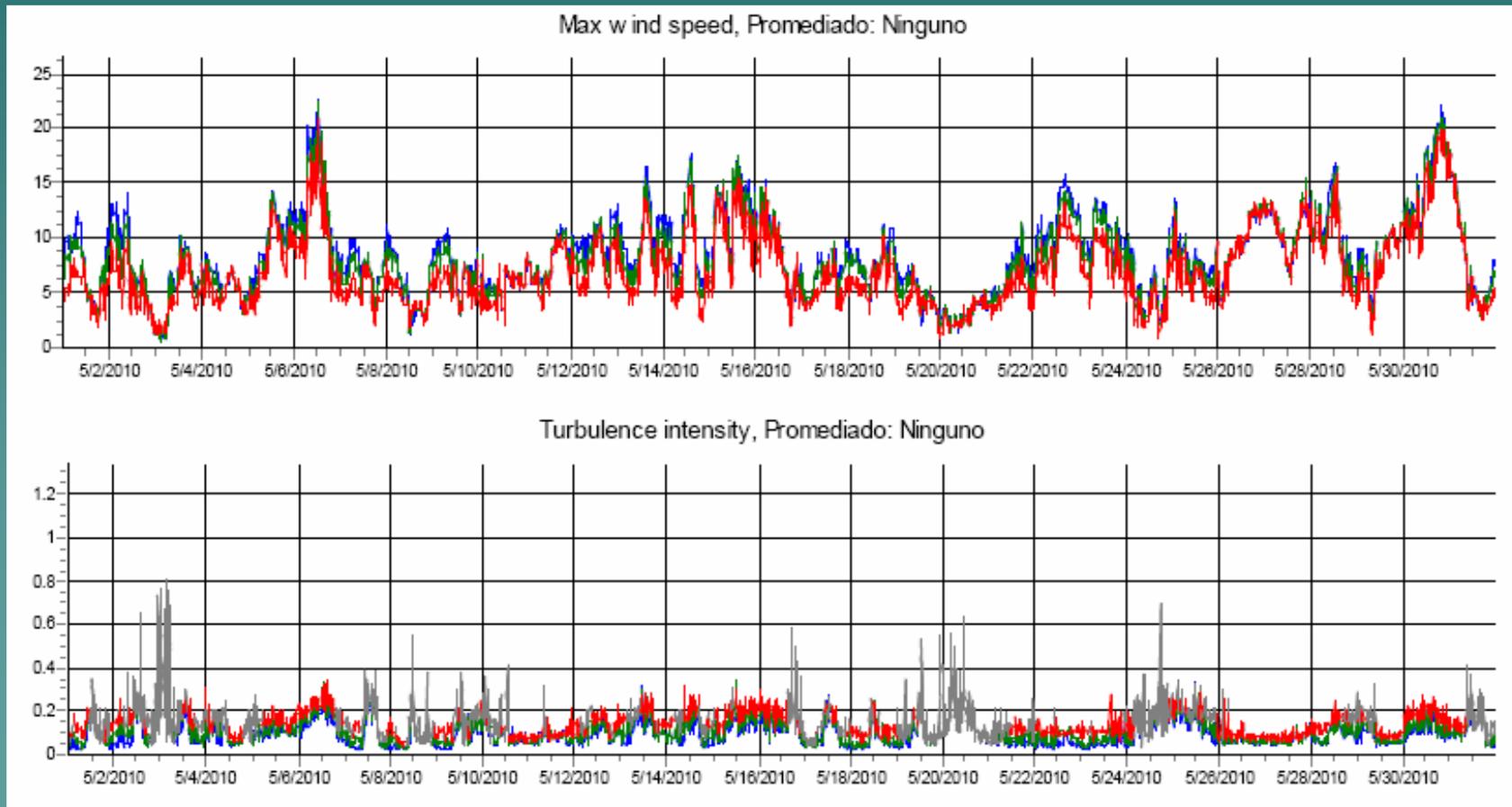
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Turbulencia:**

**Un año de mediciones**



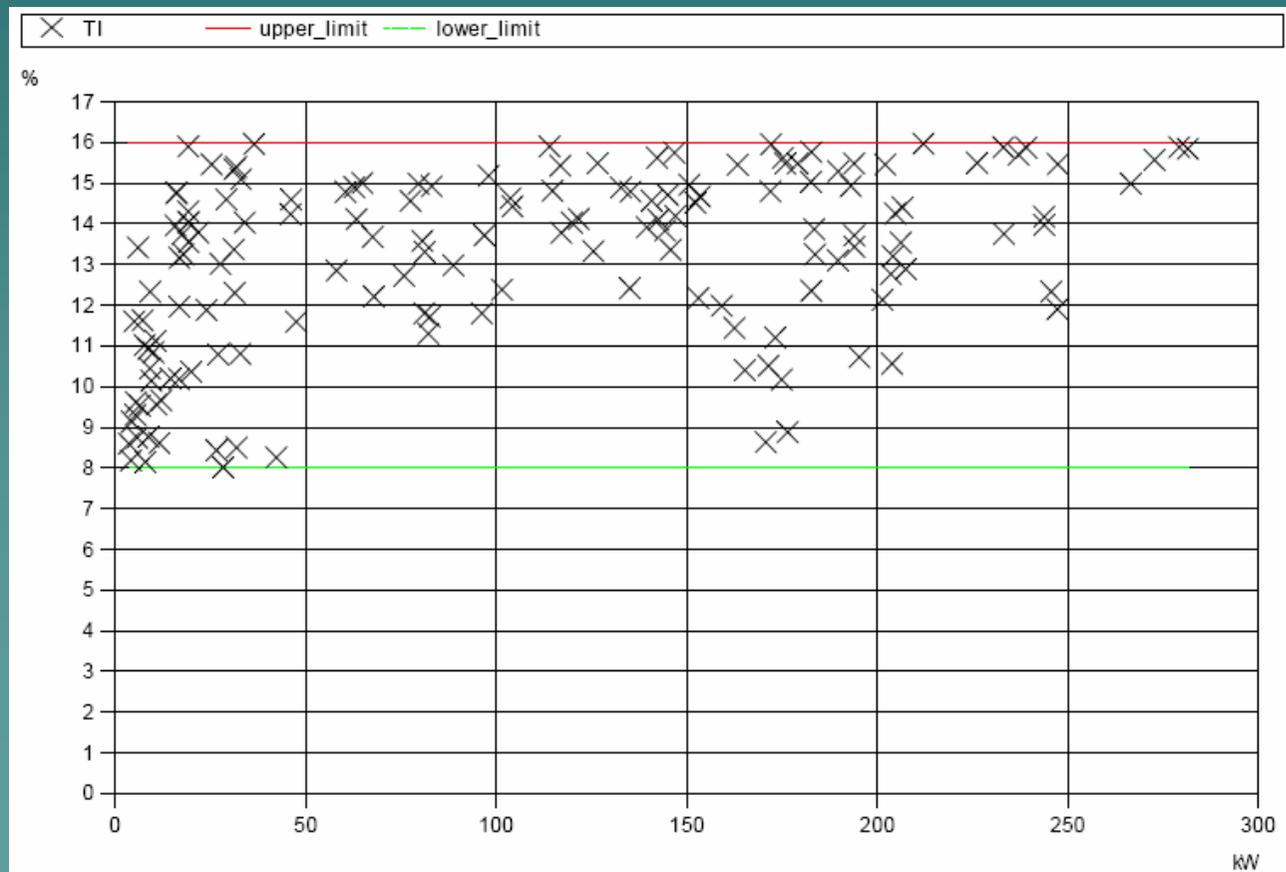
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Turbulencia:**

**Turbulencias durante ensayo de turbina eólica**



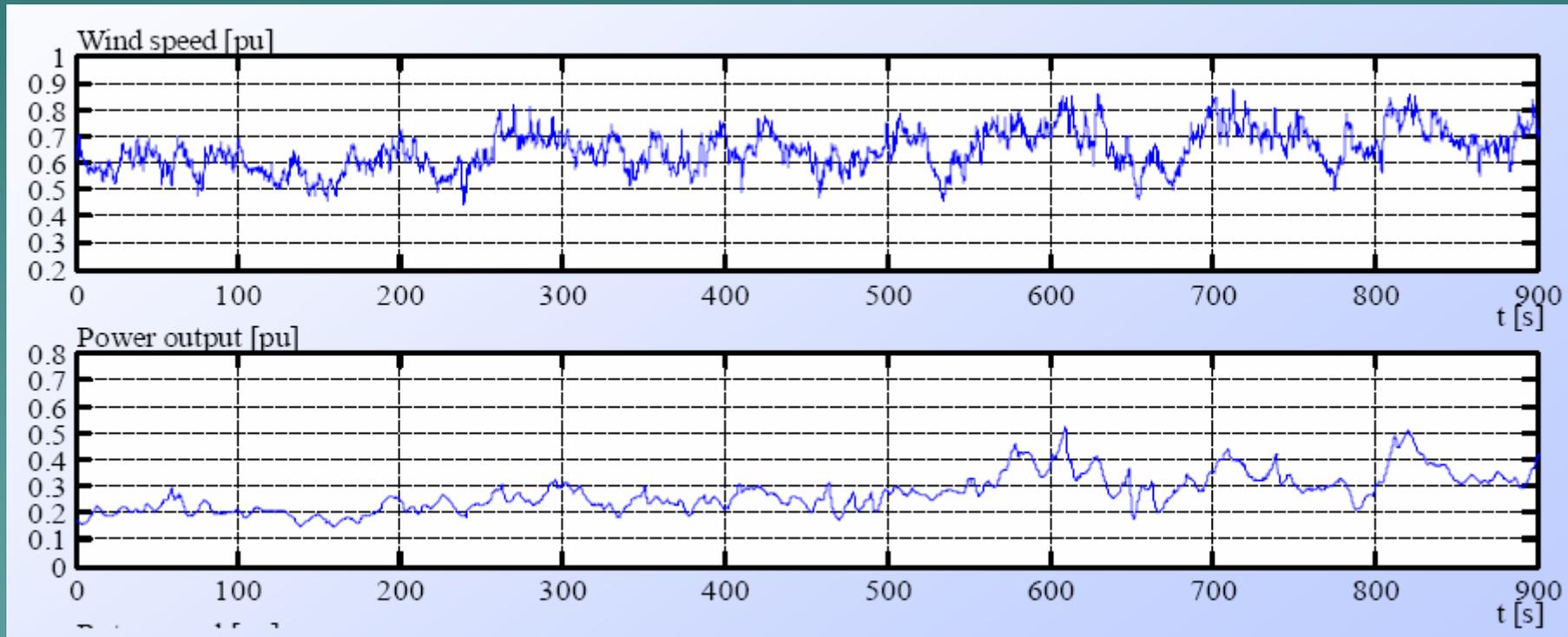
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Turbulencia:**

**Turbulencia y potencia de salida**



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

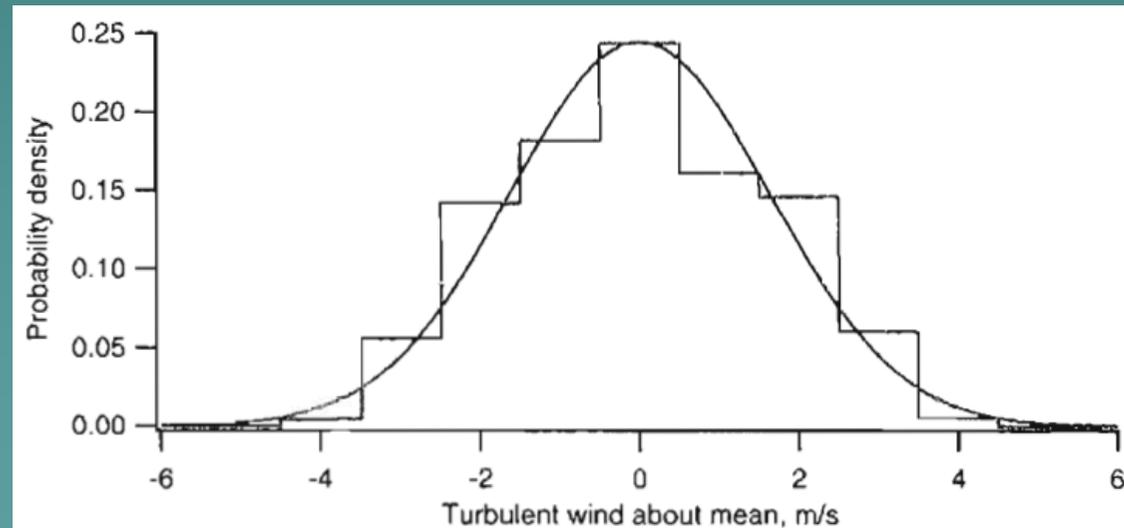
**El viento:**

**Turbulencia: Funciones de densidad de probabilidad de la velocidad del viento**

La probabilidad que el viento tenga un valor particular de velocidad queda descrita por una función de densidad de probabilidad.

La función que mas se adapta para describir el comportamiento turbulento del viento es la distribución Gaussiana o normal:

$$p(u) = \frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} e^{\left[ -\frac{(u-U)^2}{2\sigma_U^2} \right]}$$



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

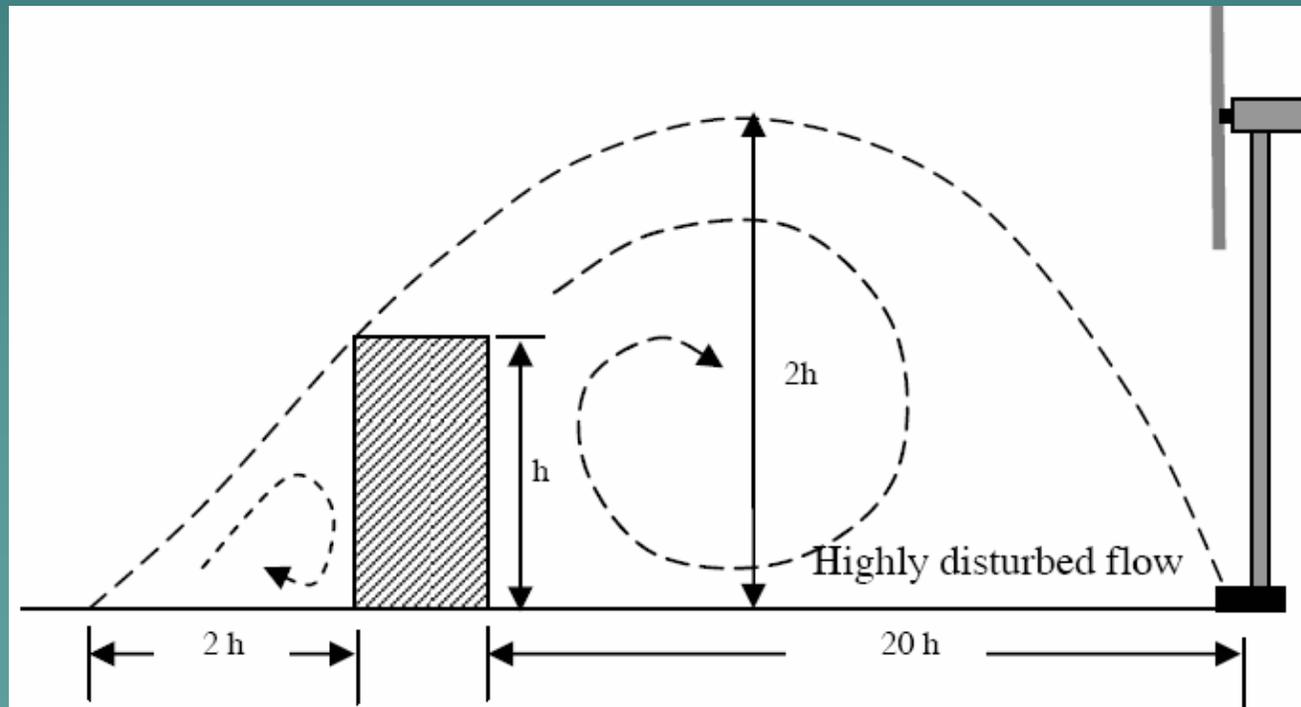
## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Efecto del terreno en las características del viento:**

Se produce cuando el viento atraviesa obstáculos y produce cambios en la velocidad y dirección.

No solo reduce la potencia del viento sino que también puede imponer fatiga a la turbina



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

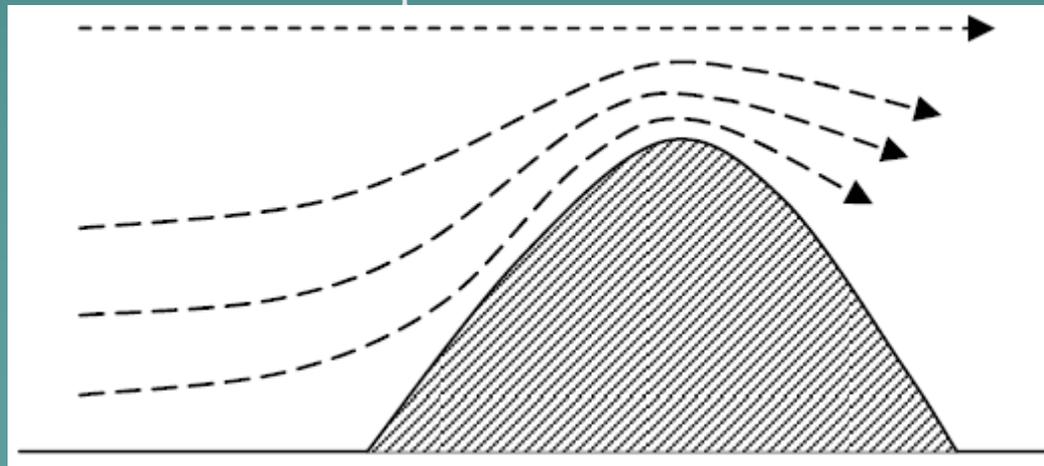
**El viento:**

**Efecto aceleración:**

Un obstáculo suave como el de la figura acelera el canal de viento que pasa sobre el mismo.

Esta situación es aprovechable para pendientes entre  $6^\circ$  y  $16^\circ$  (menos de  $3^\circ$  o más de  $27^\circ$  los efectos no son favorables)

La orientación del obstáculo respecto del viento también es importante



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Existen varias alternativas para condensar datos medidos de vientos y poder evaluar la producción de potencia de un sitio en particular; algunas son técnicas directas y otras estadísticas

Se revisarán a continuación los siguientes aspectos:

- ◆ Producción de energía de una turbina de viento
- ◆ Métodos directos de análisis de datos (no estadísticos) y caracterización del recurso
- ◆ Análisis estadísticos de datos de viento y caracterización del recurso
- ◆ Estimación de productividad de una turbina a partir de datos estadísticos

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

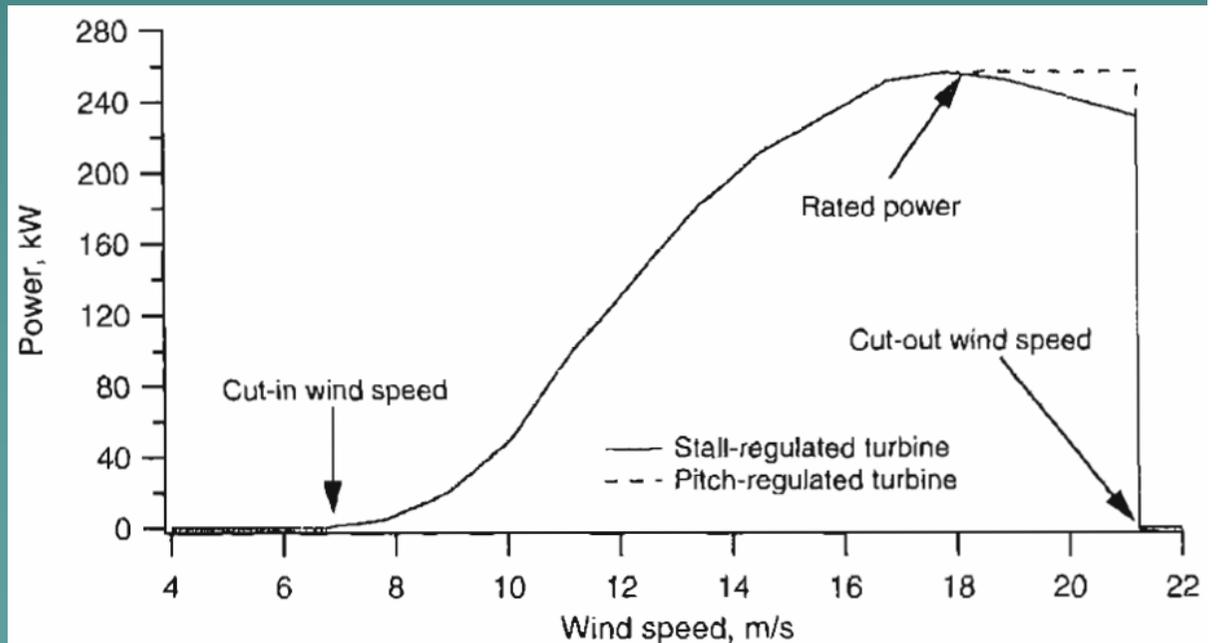
Aspectos generales de la producción de energía con una turbina de viento

La estimación del recurso consiste en la determinación de la productividad de determinada turbina en un sitio en particular del cual existe información de la velocidad del viento ya sea en forma de datos en el tiempo o en forma ya compacta (velocidad promedio, desviación estándar, etc.)

La potencia disponible del viento es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3$$

Y la disponible de una máquina puede presentarse como en la figura



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

#### Uso directo de los datos

Se dispone un una serie de  $N$  mediciones de viento, cuyo valor promedio cada intervalo  $\Delta t$  es  $U_i$ ,

1) El promedio para el periodo medido es  $\bar{U}$  :

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i$$

2) La desviación estándar  $\sigma_u$ :

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$

3) La densidad de potencia promedio del viento,  $\bar{P}/A$ , es el promedio de potencia disponible por unidad de área:

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Uso directo de los datos

Análogamente, la densidad promedio de energía por unidad de área para un período extendido de tiempo  $N\Delta t$ :

$$\overline{E}/A = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^N U_i^3 = \left( \frac{\overline{P}}{A} \right) (N\Delta t)$$

4) La potencia promedio de la máquina con ese viento  $\overline{P}_w$

$$\overline{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_w(U_i)$$

donde  $P_w(U_i)$  es la potencia de salida obtenida de la curva potencia-viento de la máquina

5) La energía de la máquina para ese viento,  $E_w$ , será

$$E_w = \sum_{i=1}^N P_w(U_i)(\Delta t)$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Uso directo de los datos

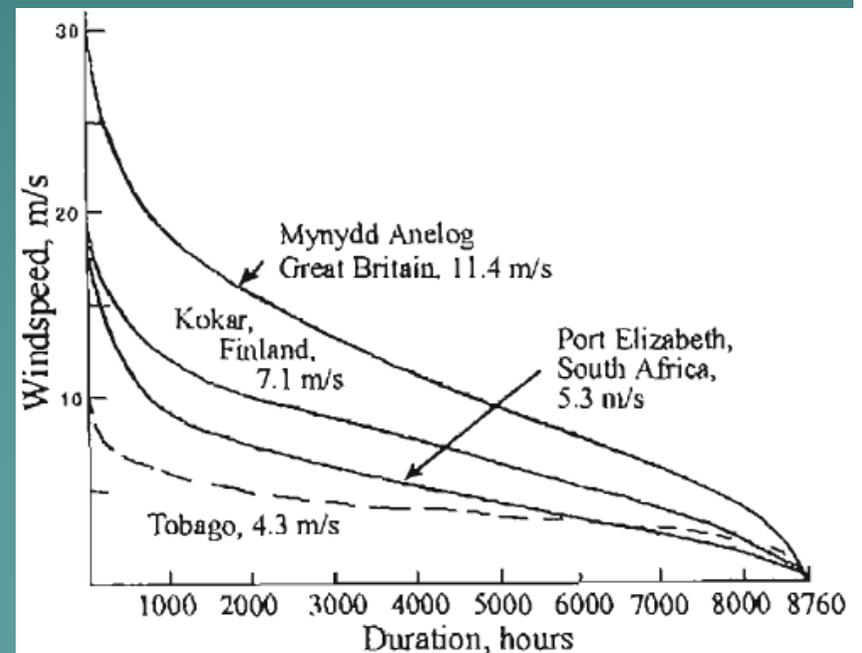
Otra alternativa: curvas velocidad-duración y potencia duración

Puede ser útil para comprar potenciales energéticos del viento entre distintos lugares

Curvas como la siguiente se pueden armar para distintos lugares a partir de datos

Esta curva velocidad-duración puede convertirse a potencia-duración elevando al cubo la ordenada

Las áreas bajo la curva potencia-duración indican la disponibilidad anual de energía



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

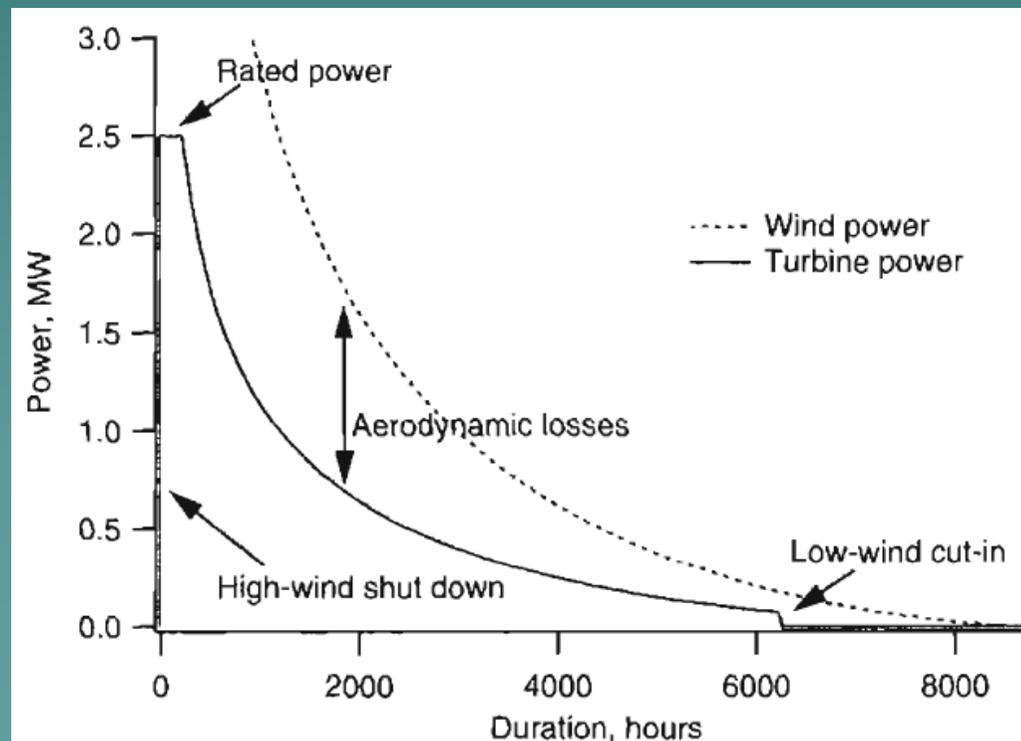
## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Uso directo de los datos

Otra alternativa: curvas velocidad-duración y potencia duración

Entre la curva potencia-duración del viento y la curva de una turbina en particular se puede obtener una curva de productividad para una máquina en ese punto:



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

#### Análisis estadísticos de los datos del viento

La proyección de datos de un lugar a otro, o cuando se dispone de datos muy condensados, puede tener sentido el uso de representaciones estadísticas de la distribución probabilística de la velocidad del viento

La base de estos análisis está en la función de densidad de probabilidad de la velocidad del viento  $p(U)$ ; esto es: la probabilidad de que la velocidad del viento se encuentre entre  $U_a$  y  $U_b$  está dada por:

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} p(U) dU$$

Y el área total bajo la curva de distribución de probabilidad está dada por:

$$\int_c^{\infty} p(U) dU = 1$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Si se conoce  $p(U)$  se pueden calcular los siguientes parámetros:

El valor medio de la velocidad del viento:

$$\bar{U} = \int_c^{\infty} U p(U) dU$$

La desviación estándar de la velocidad del viento:

$$\sigma_U = \sqrt{\int_c^{\infty} (U - \bar{U})^2 p(U) dU}$$

Densidad de potencia media disponible del viento:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \int_c^{\infty} U^3 p(U) dU = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3$$

La función densidad de probabilidad se puede superponer en un histograma de velocidades del viento en una escala adecuada en el área del histograma

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Otro parámetro estadístico importante es la función de distribución acumulativa  $F(U)$  ya que representa la fracción de tiempo o la probabilidad que la velocidad del viento sea más pequeña o igual a determinada velocidad  $U'$ :

$$F(U) = \int_c^U p(U') dU'$$

Por otro lado, la pendiente de la función de distribución acumulativa es la función de densidad de probabilidad:

$$p(U) = \frac{dF(U)}{dU}$$

Para el análisis de datos de viento en general se usan dos distribuciones de probabilidad: la de Rayleigh y la de Weibull.

Rayleigh usa un parámetro: la velocidad media del viento

Weibull, que representa mejor una amplia variedad de regímenes de viento, emplea dos parámetros que se verán enseguida

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

#### Distribución de Rayleigh:

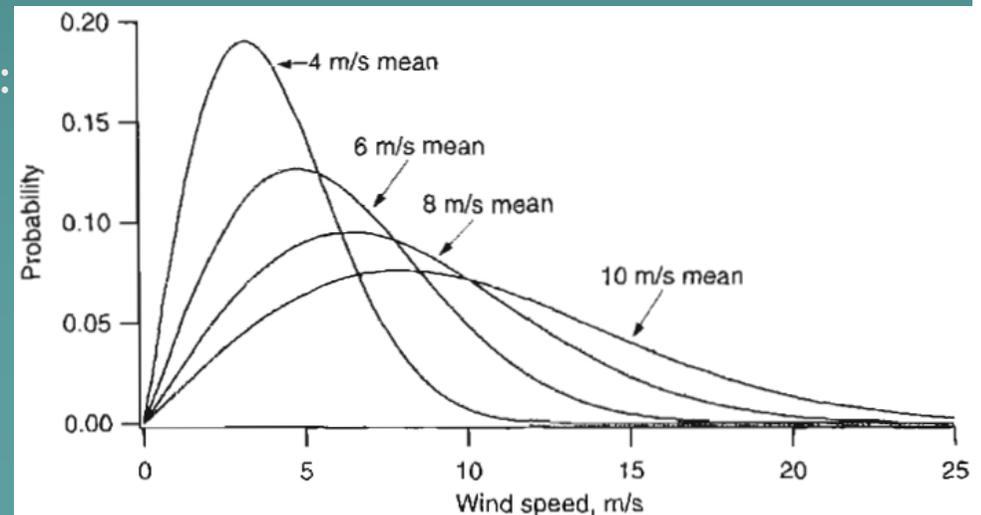
Se debe conocer  $\bar{U}$

A partir de ello la función de densidad de probabilidad:

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

Y la función de distribución acumulativa:

$$F(U) = 1 - e^{-\frac{\pi}{4} \left( \frac{U}{\bar{U}} \right)^2}$$



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

#### Distribución de Weibull:

Para este caso la función de densidad de probabilidad es:

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

Donde  $k$  es el factor de forma y  $c$  el factor de escala.

Y la función de distribución acumulativa:

$$F(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k}$$

Esta última es útil para estimar el tiempo durante el cual la velocidad del viento se encuentre dentro de un determinado intervalo:

$$p(U_a \leq U \leq U_b) = F(U_b) - F(U_a) = e^{-\left(\frac{U_a}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{U_b}{c}\right)^k}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Distribución de Weibull:

Análogamente al caso anterior puede interesar estimar el tiempo que la velocidad del viento sea inferior a cut-in o supere el cut-out; para este último caso, y si  $U_x$  es la velocidad de cut-out:

$$p(U \geq U_x) = 1 - \left( 1 - e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k} \right) = e^{-\left(\frac{U_x}{c}\right)^k}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

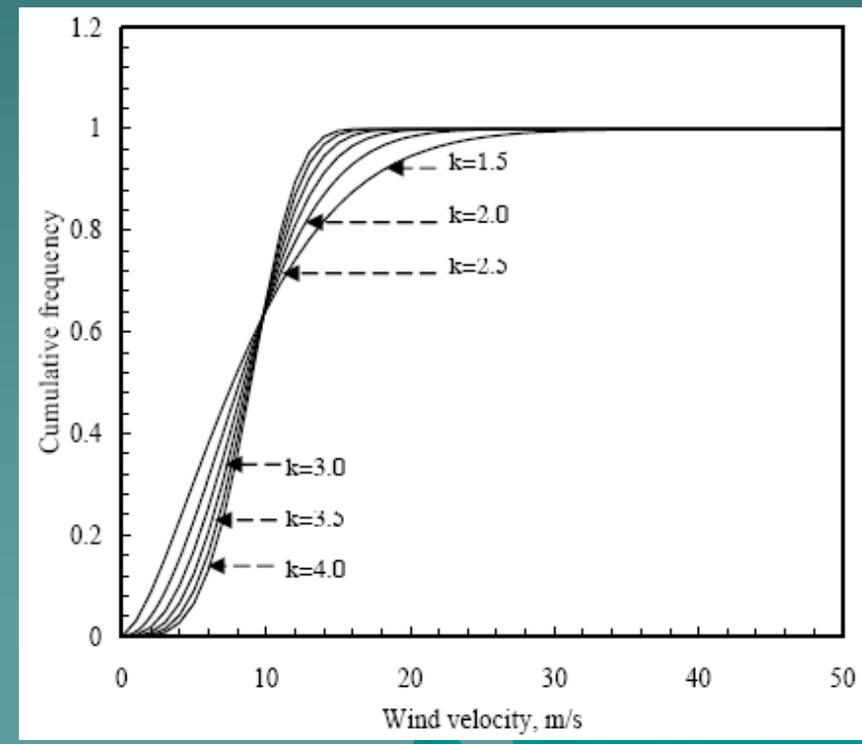
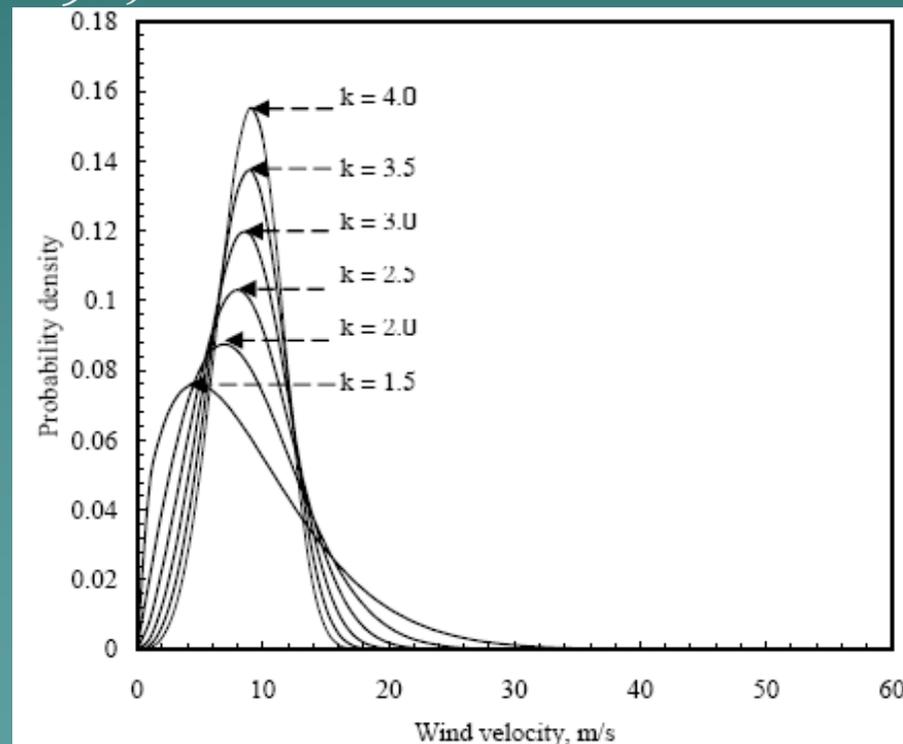
## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Distribución de Weibull:

El factor determinante en la uniformidad del viento es  $k$  (en las curvas de abajo  $c = 9.8$ )



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Distribución de Weibull: El problema de determinar  $k$  y  $c$ :

#### Método gráfico:

Se transforma la función de distribución acumulativa en una función lineal adoptando escalas logarítmicas:

$$1 - F(U) = e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k}$$

Tomando logaritmo dos veces:

$$\ln\{-\ln[1 - F(U)]\} = k \ln(U_i) - k \ln c$$

Se grafica en el eje  $x$   $\ln(U_i)$

Y en el  $y$   $\ln\{-\ln[1 - F(U)]\}$

En tal caso  $k$  da la pendiente y  $-k \cdot \ln(c)$  el corte del eje  $x$

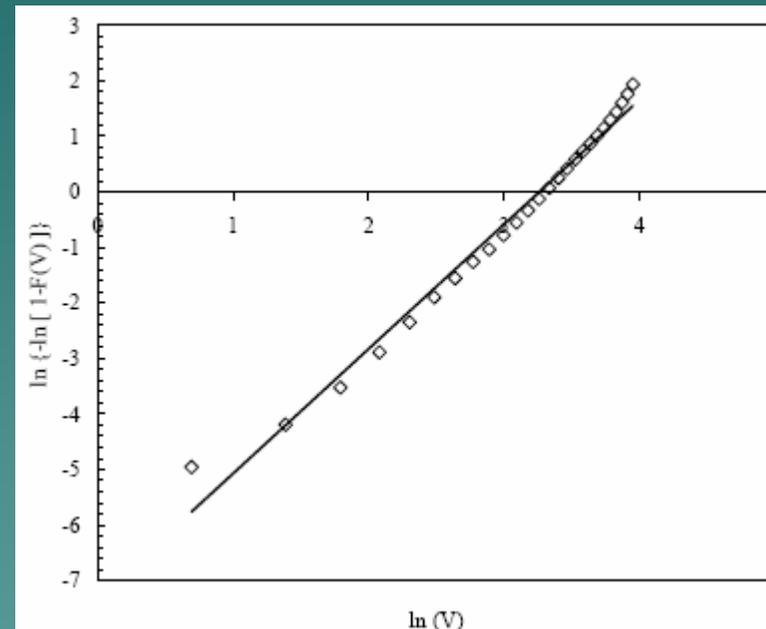
# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Ejemplo:

No	V (km/h)	Frequency	F(V)
1	0	0.002	0.002
2	1-2	0.005	0.007
3	3-4	0.008	0.015
4	5-6	0.014	0.029
5	7-8	0.025	0.054
6	9-10	0.037	0.091
7	11-12	0.048	0.139
8	13-14	0.051	0.19
9	15-16	0.057	0.247
10	17-18	0.051	0.298
11	19-20	0.069	0.367
12	21-22	0.07	0.437
13	23-24	0.073	0.51
14	25-26	0.074	0.584
15	27-28	0.072	0.656
16	29-30	0.066	0.722
17	31-32	0.058	0.78
18	33-34	0.054	0.834
19	35-36	0.041	0.875
20	37-38	0.033	0.908
21	39-40	0.028	0.936
22	41-42	0.021	0.957
23	43-44	0.017	0.974
24	45-46	0.011	0.985
25	47-48	0.008	0.993
26	49-50	0.004	0.997
27	51-52	0.002	0.999
28	53-54	0.001	1
29	55-56	0	1
30	57-58	0	1
31	59-60	0	1



$$y = 2.24x - 7.32$$

$$c = 7.32$$

$$k = 2.24$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Distribución de Weibull: El problema de determinar  $k$  y  $c$ :

Método de la desviación estándar:

Una buena aproximación para  $k$  es:

$$k = \left( \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1,09}$$

Y para  $c$ :

$$c = \frac{\bar{U} k^{2,6674}}{0,184 + 0,816 k^{2,7385}}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Análisis estadísticos de los datos del viento

Distribución de Weibull: El problema de determinar  $k$  y  $c$ :

Método de la máxima probabilidad:

Este método requiere resolver las siguientes ecuaciones:

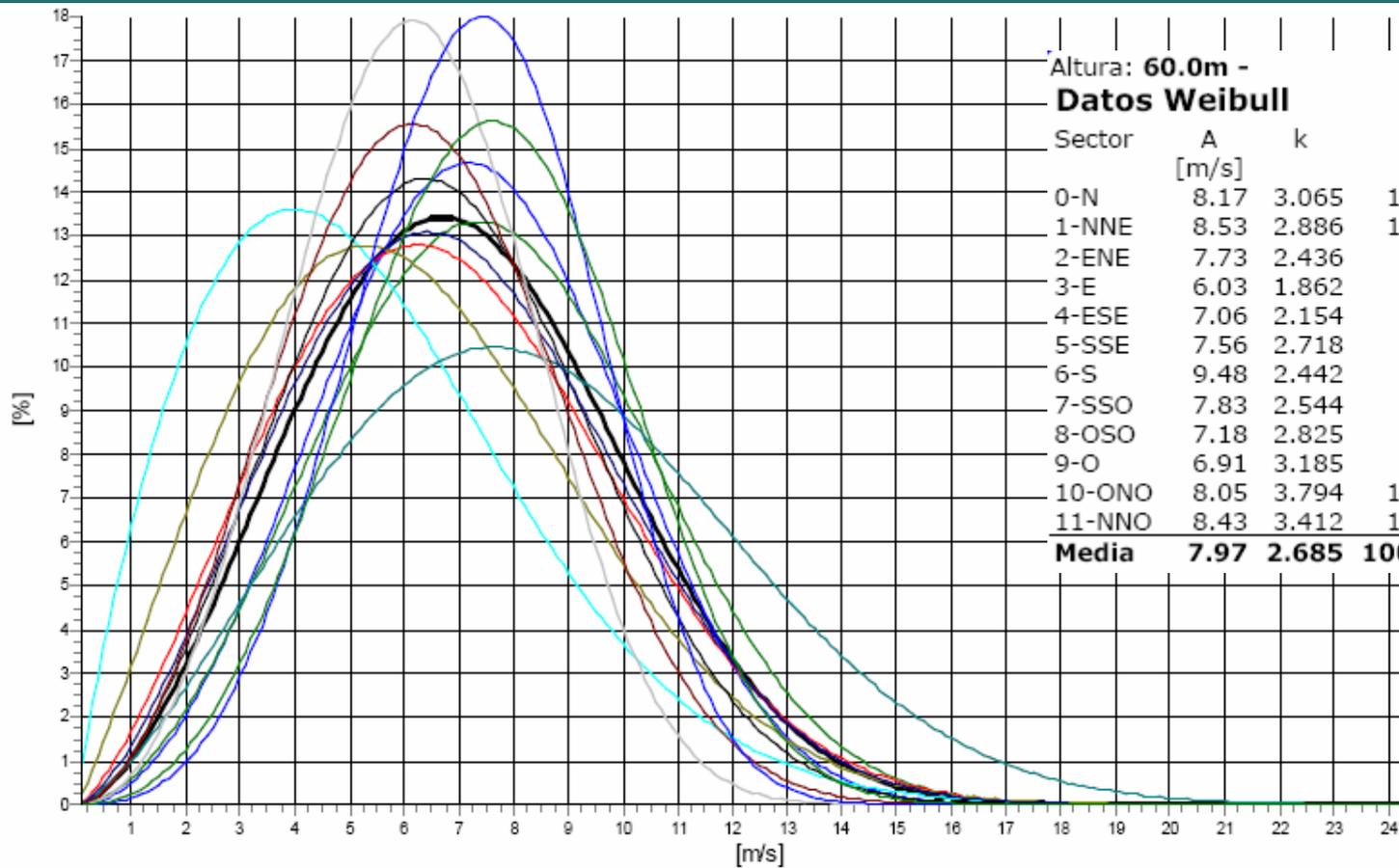
$$k = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n U_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^n U_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^n \ln(U_i)}{n} \right]^{-1}$$

$$c = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i^k \right]^{1/k}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

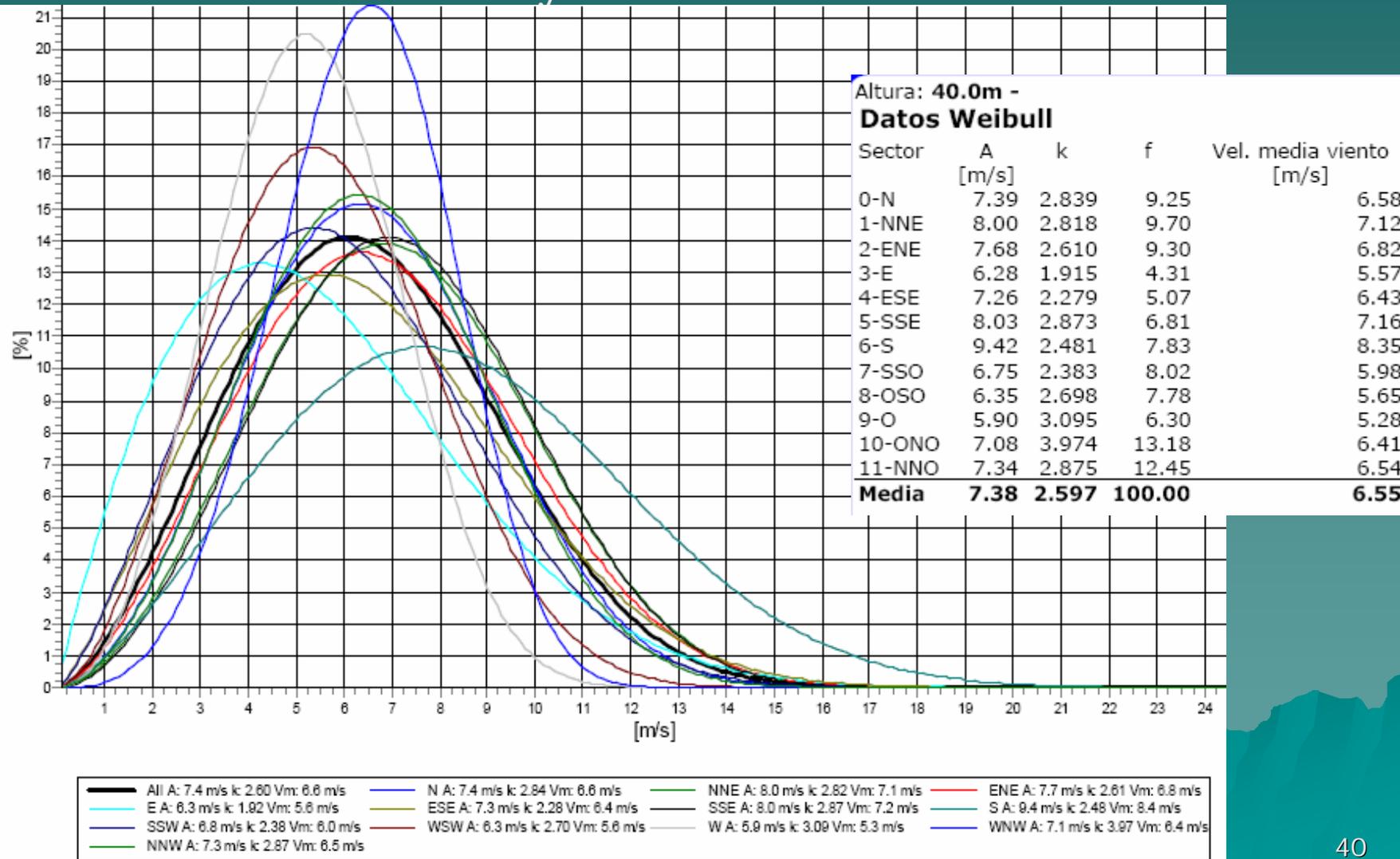


All A: 8.0 m/s k: 2.68 Vm: 7.1 m/s	N A: 8.2 m/s k: 3.07 Vm: 7.3 m/s	NNE A: 8.5 m/s k: 2.89 Vm: 7.6 m/s	ENE A: 7.7 m/s k: 2.44 Vm: 6.9 m/s
E A: 6.0 m/s k: 1.86 Vm: 5.4 m/s	ESE A: 7.1 m/s k: 2.15 Vm: 6.3 m/s	SSE A: 7.6 m/s k: 2.72 Vm: 6.7 m/s	S A: 9.5 m/s k: 2.44 Vm: 8.4 m/s
SSW A: 7.8 m/s k: 2.54 Vm: 6.9 m/s	WSW A: 7.2 m/s k: 2.83 Vm: 6.4 m/s	WA: 6.9 m/s k: 3.18 Vm: 6.2 m/s	WNW A: 8.0 m/s k: 3.79 Vm: 7.3 m/s
NNW A: 8.4 m/s k: 3.41 Vm: 7.6 m/s			

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

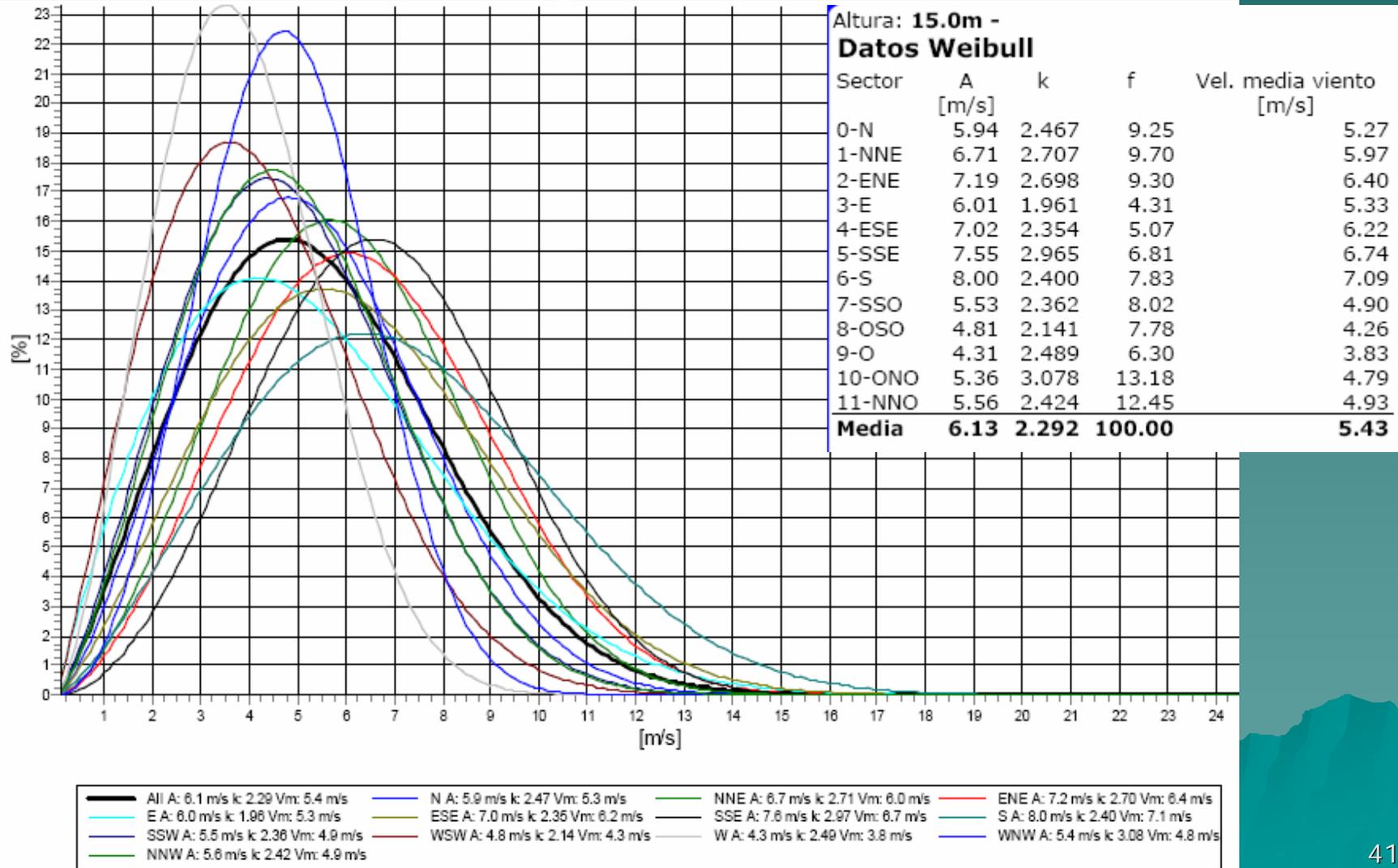
### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Estimación de la producción de energía usando técnicas estadísticas

Se supone que se conoce la distribución probabilística del régimen de viento  $p(U)$  y la curva de potencia de la máquina  $P_w(U)$  con lo que la potencia media de la máquina sería:

$$\overline{P_w} = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU$$

La curva de potencia de la máquina en función de la potencia del viento y el coeficiente de potencia del rotor  $C_p$ :

$$P_w(U) = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta U^3$$

Con lo que la potencia media de la máquina puede expresarse como:

$$\overline{P_w} = \frac{1}{2} \rho A \eta \int_0^{\infty} C_p(\lambda) U^3 p(U) dU$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Cálculo de productividad con máquina ideal usando distribución de Rayleigh

Puede hacerse una estimación de la potencia anual media máxima posible para un rotor de determinado diámetro suponiendo una máquina ideal y una función de densidad de probabilidad de Rayleigh

Se asumirá:

- ◆ Turbina ideal sin pérdidas con un coeficiente de potencia igual al límite de Betz  
 $C_{pBetz} = 16/27$
- ◆ La distribución probabilística de viento está dada por una distribución de Rayleigh

Si a la expresión de potencia media de la máquina (última ecuación de la última transparencia) se la combina con una distribución de Rayleigh y se define la velocidad característica como:

$$U_c = \frac{2\bar{U}}{\sqrt{\pi}}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Cálculo de productividad con máquina ideal usando distribución de Rayleigh

La expresión para la potencia media de la máquina será:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A \eta \int_0^{\infty} C_p(\lambda) U^3 \left\{ \frac{2U}{U_c^2} e^{\left[-\left(\frac{U}{U_c}\right)^2\right]} \right\} dU$$

Con  $\eta = 1$  y  $C_p = C_{pBetz} = 16/27$ , se tendrá:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A U_c^3 C_{pBetz} \int_0^{\infty} \left(\frac{U}{U_c}\right)^3 \left\{ \frac{2U}{U_c^2} e^{\left[-\left(\frac{U}{U_c}\right)^2\right]} \right\} dU / U_c$$

Se normaliza la velocidad del viento definiendo una velocidad adimensional  $x = U/U_c$

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A U_c^3 C_{pBetz} \int_0^{\infty} (x)^3 \left\{ 2xe^{-(x)^2} \right\} dx$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

Cálculo de productividad con máquina ideal usando distribución de Rayleigh

Evaluada la integral anterior se llega a:

$$\overline{P}_w = \frac{1}{2} \rho A U_c^3 (16/27) (3/4) \sqrt{\pi}$$

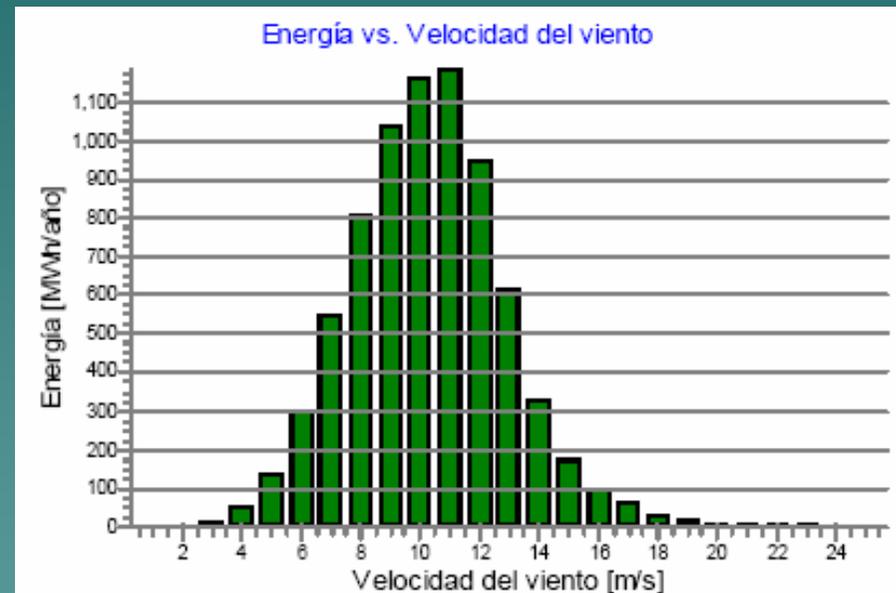
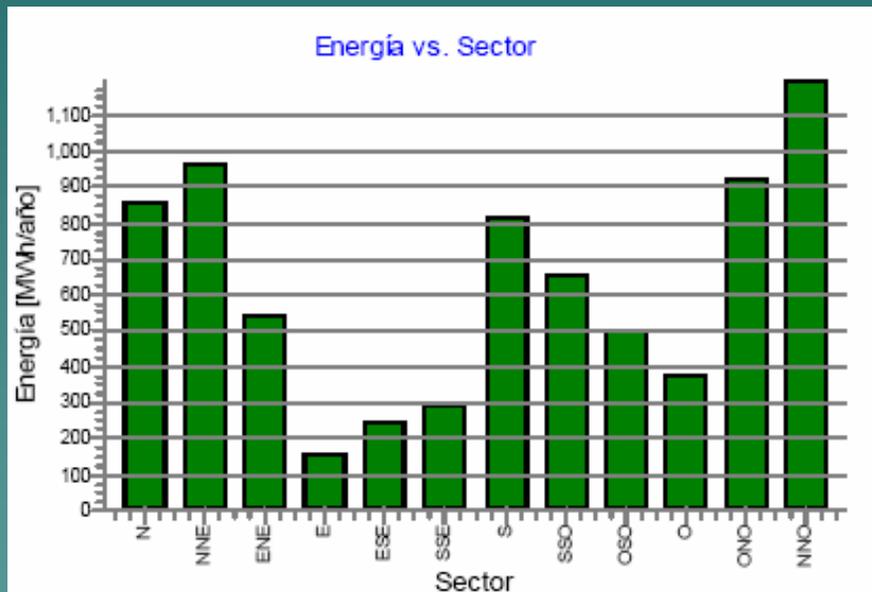
Con lo cual para una determinada área de barrido que conlleve a un diámetro  $D$  y una velocidad característica  $U_c$ :

$$\overline{P}_w = \rho \left( \frac{2}{3} D \right)^2 \overline{U}^3$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

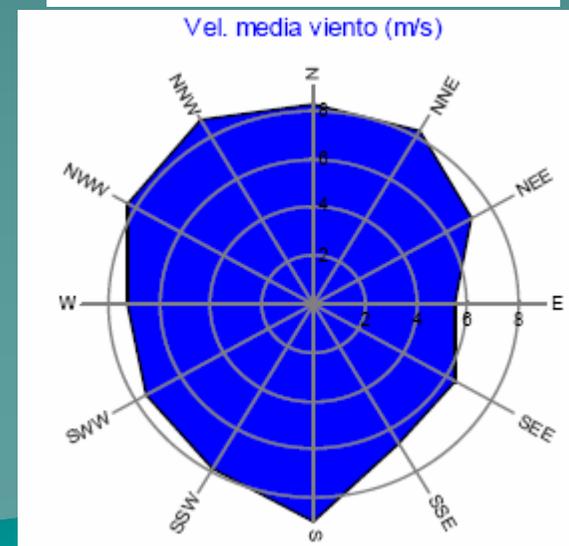
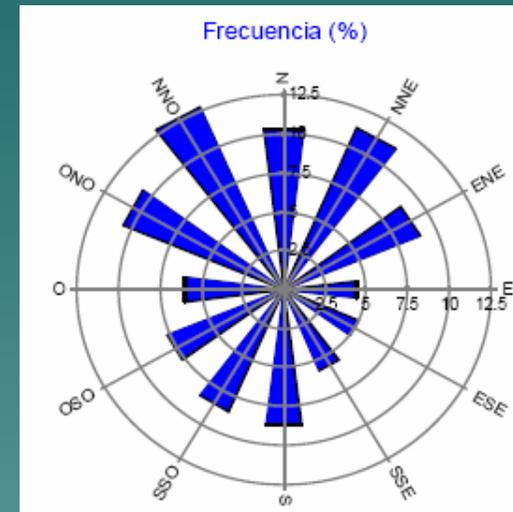
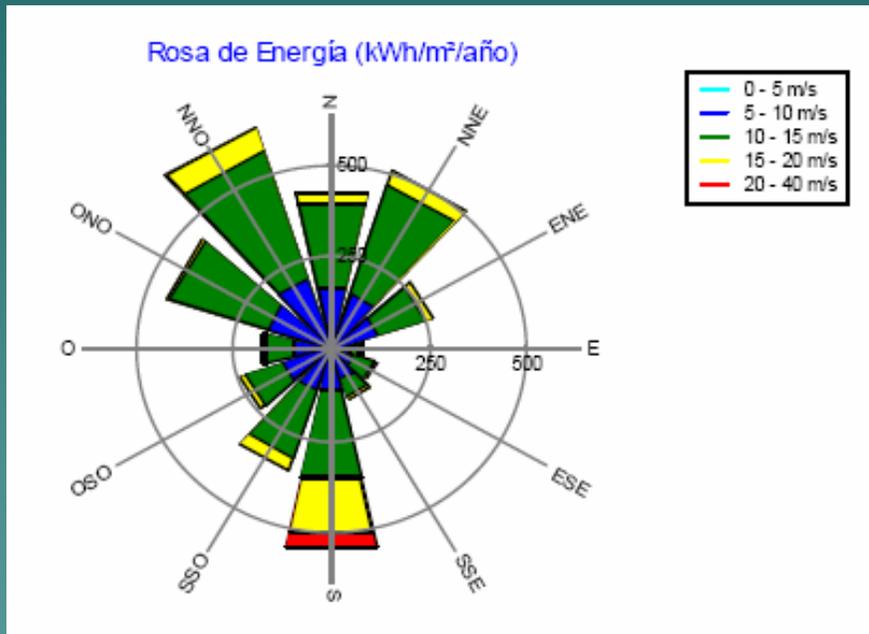
**El viento: Análisis de datos y estimación del recurso**



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### El viento: Análisis de datos y estimación del recurso

### Cálculo de productividad para una turbina real usando distribución de Weibull

Partiendo de las siguientes dos ecuaciones ya conocidas:

$$\overline{P_w} = \int_0^{\infty} P_w(U) p(U) dU \quad p(U) = \frac{dF(U)}{dU}$$

Se puede escribir empleando la función de distribución acumulativa:

$$\overline{P_w} = \int_0^{\infty} P_w(U) dF(U)$$

Y recordando que:

$$F(U) = 1 - e^{-\left(\frac{U}{c}\right)^k}$$

Para una partición de las curvas en  $N_B$  intervalos la potencia media de la máquina:

$$\overline{P_w} = \sum_{j=1}^{N_B} \left\{ e^{-\left[\frac{U_{j-1}}{c}\right]^k} - e^{-\left[\frac{U_j}{c}\right]^k} \right\} P_w \left[ \frac{U_{j-1} + U_j}{2} \right]$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Conexión a la red:

- ◆ Directa
- ◆ Indirecta: Algún dispositivo adapta la tensión y la frecuencia

#### Velocidad del generador:

La velocidad de giro determina básicamente:

- ◆ El aprovechamiento del viento, variando TSR ( $\lambda$ )
- ◆ Forma de interconexión a la red
- ◆ Solicitaciones mecánicas

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Velocidad del generador:

- ◆ *Velocidad constante*: la variación de velocidad de giro es menor al 2%; Típicamente un motor asíncrono conectado directamente a la red con dos devanados; 6 polos para velocidades bajas y 4 para velocidades altas
- ◆ *Velocidad prácticamente constantes*: variación de velocidad menor al 10%; generadores asíncronos con resistencias retóricas para permitir mayor deslizamiento
- ◆ *Velocidad variable*: tienden a ser las más frecuentes en el mercado; Típicamente asíncronos doblemente alimentados o síncronos conectado por inversor

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Sistemas de Control – Velocidad de la turbina

#### Funcionamiento por variación del ángulo de paso, Pitch control:

Se varía el ángulo de paso de las palas (control de par torsor para evitar sobrecargas de caja y generador); es un proceso mecánico lento....

Ejemplo de estrategia de control: si la máquina está funcionando **cerca de su potencia nominal** el deslizamiento está en la mitad del máximo posible, entonces

◆ Se viene una ráfaga, si todo se deja como estás se supera la potencia nominal... se aumenta el deslizamiento para permitir mayor velocidad del rotor (es la respuesta técnicamente más rápida que se puede dar) .... Se va acomodando el ángulo de las palas para capturar menos potencia del viento....el deslizamiento se va acomodando a su valor original..

◆ Cae el viento.....queda potencia para sacar del generador???? Si??? Se acomoda el ángulo para buscar mayor eficiencia....

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Sistemas de Control – Velocidad de la turbina

#### Control por pérdida aerodinámica, Stall control:

No hay control de ángulo. El perfil de la pala se diseña aerodinámicamente para asegurar la pérdida de sustentación cuando se alcanza la velocidad de diseño

Ventaja: se evitan las partes móviles y el sistema de control

Desventaja: Complejo diseño y complicaciones por las vibraciones mecánicas cuando entra en “pérdida”

Más aplicable en potencias menores

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Sistemas de Control – Velocidad de la turbina

#### Control activo por pérdida aerodinámica, Active Stall control:

Las palas pueden girar unos pocos grados

Este control se usa para entrar en “perdida” con velocidades altas del viento

Con velocidades de viento baja la regulación de ángulo es como en Pitch Control

Una vez alcanzada la velocidad nominal las palas se orientan para entrar en “pérdida” y consumir el exceso de energía en forma de turbulencia

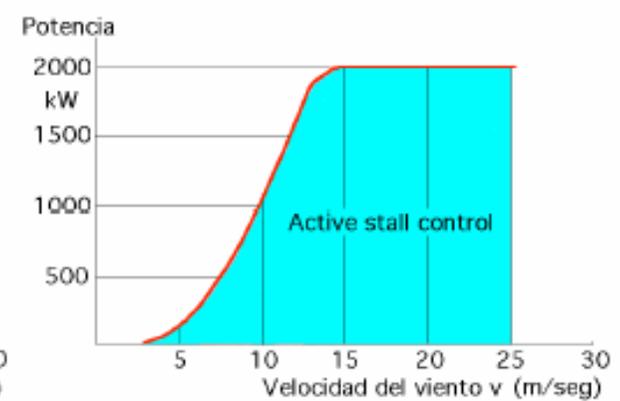
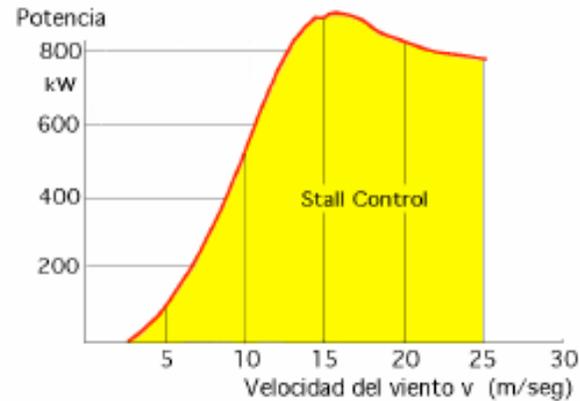
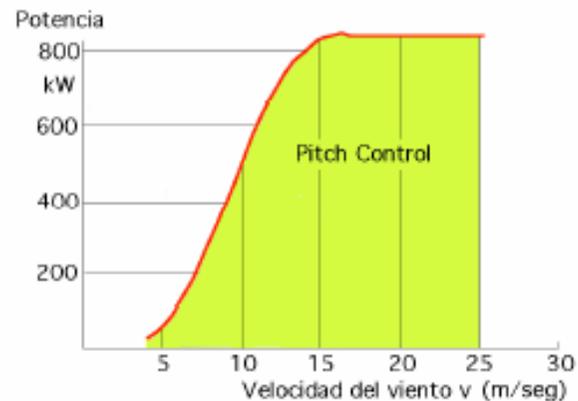
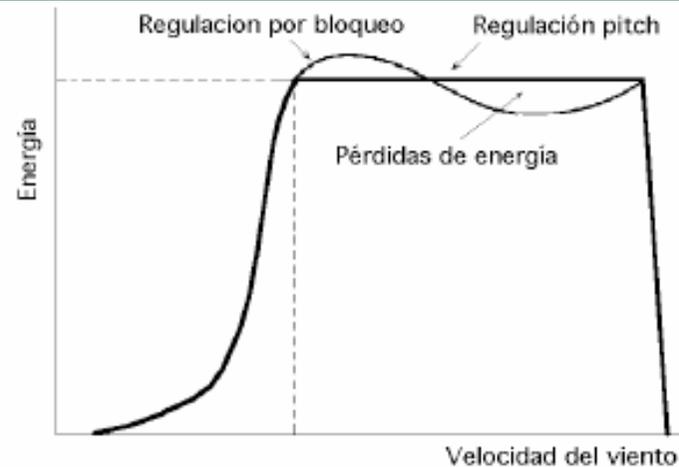
La máquina puede funcionar a potencia nominal para un amplio rango de velocidades del viento. En el sistema de regulación pasiva se pierde producción a medida que la velocidad del viento crece (ver figuras siguientes)

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Sistemas de Control – Velocidad de la turbina



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Control de potencia:

El punto de funcionamiento de la turbina se determina continuamente..., sin embargo se pueden distinguir los siguientes estados operativos básicos:

- ◆ Turbina parada: velocidad del viento menor que la mínima necesaria (3 a 5 m/s) o por encima de la máxima admisible (alrededor de 25 m/s). Cut-in y Cut-out.
- ◆ Turbina a carga parcial: se trata de capturar la máxima energía posible del viento para llegar cuanto antes a la potencia nominal (para una velocidad de 12 a 15 m/s)
- ◆ Turbina a plena carga: la velocidad del viento es mayor que la nominal y menor que la de desconexión

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Control de potencia:

El sistema de control tiene un sistema de supervisión y otro de control de potencia y velocidad propiamente dichos

*El sistema de control de potencia* controla el par suavizando la potencia de salida del generador, amortiguando las oscilaciones electromecánicas

*El sistema de control de velocidad* controla el ángulo de paso de las palas para:

- ◆ Capturar toda la energía posible para cada condición atmosférica que se presente
- ◆ Proteger el rotor, al generador y los equipos de electrónica de potencia de sobrecargas durante ráfagas
- ◆ Proteger la aeroturbina durante las pérdidas de cargas

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### Aspectos de funcionamiento de los aerogeneradores

#### Control de potencia:

A *carga parcial* se consideran dos tipos básicos de control:

El primero: La máxima potencia extraíble del viento es para un TCR óptimo. El sistema de control “conoce” la curva de potencia de la turbina y además se dispone de la velocidad del viento y del rotor. Para esa condición se determina el TCR óptimo y por lo tanto se adecua la velocidad de la turbina para esa condición.

El segundo: Se basa en la potencia máxima. Se modifica suavemente la velocidad de giro y se verifica la variación de potencia con la velocidad ( $\Delta P/\Delta \omega$ ):

- ◆  $\Delta P/\Delta \omega > 0$ , se incrementa la velocidad del rotor
- ◆  $\Delta P/\Delta \omega < 0$ , se baja la velocidad del rotor
- ◆  $\Delta P/\Delta \omega = 0$ , la velocidad del rotor se mantiene

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Medición del viento:**

Anemómetros rotacionales:

Tres o cuatro copas sujetas a un eje vertical rotativo

Son básicamente dispositivos de arrastre; el viento

Ejerce una fuerza de arrastre:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} A \rho_a V^2$$

El coeficiente de arrastre  $C_D$  es mayor para una superficie cóncava que una convexa lo que termina imprimiéndole un giro al dispositivo que es proporcional a la velocidad del viento

El dispositivo es calibrado y se le anexa un elemento registrador

Limitaciones:

- ◆ Respuesta rápida en la aceleración y lenta en la desaceleración
- ◆ La fuerza de arrastre depende de la densidad del aire



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Medición del viento:**

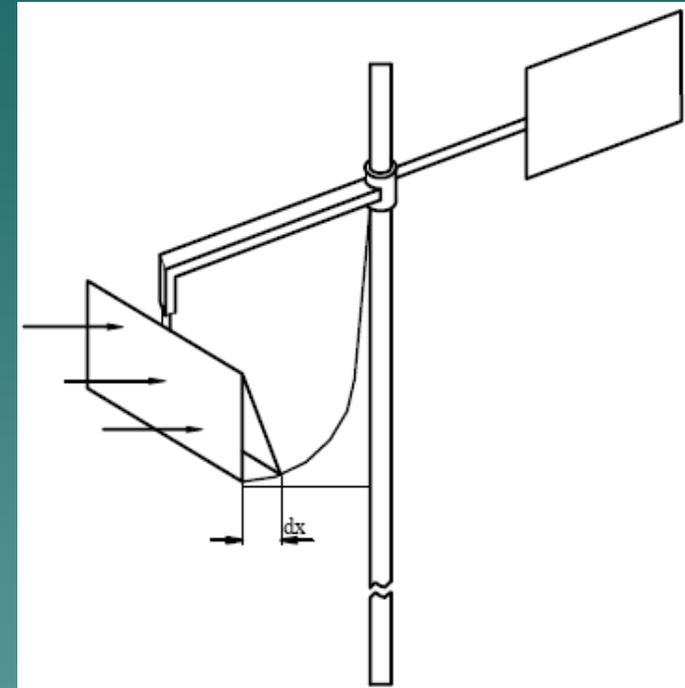
Anemómetros de placa de presión:

Una placa flotante orientada perpendicularmente a la dirección del viento

El coeficiente de arrastre de una placa plana puede suponerse unitario; por lo tanto, de la misma ecuación anterior, la presión sobre tal placa será:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a V^2$$

El desplazamiento  $dx$  es proporcional a la fuerza del viento lo que puede calibrarse en términos de su velocidad



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Medición del viento:**

Anemómetros de tubo de presión:

En un caso el flujo del viento genera una presión y en el otro una succión.

Si  $P_A$  es la presión atmosférica:

$$P_1 = P_A + C_1 \frac{1}{2} \rho_a V^2$$

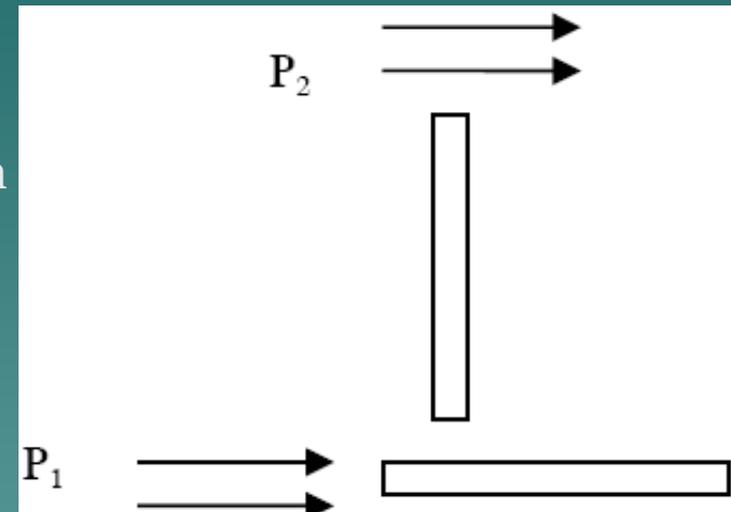
$$P_2 = P_A - C_2 \frac{1}{2} \rho_a V^2$$

De la resta de ambas: 
$$V = \left[ \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_a (C_1 + C_2)} \right]^{0,5}$$

$C_1$  y  $C_2$  son propios del instrumento

Ventaja: No tiene partes móviles

Desventaja: En mediciones de campo la presencia de insectos, cuerpos extraños altera su funcionamiento normal



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Medición del viento:**

Anemómetros sónicos:

El principio de medida es el de la variación de la velocidad del sonido en el aire. En cada aspa del dispositivo se emiten señales acústicas que viajan a favor y en contra de la dirección del viento.

Si  $V_s$  es la velocidad del sonido en el aire fijo y  $V$  es la velocidad del viento, y si el sonido y el viento se mueven en la misma dirección la velocidad resultante de la onda sonora  $V_1$  es:

$$V_1 = V_s + V$$

Si la velocidad del sonido es opuesta a la dirección del viento, La velocidad resultante de la onda sonora  $V_2$  será:

$$V_2 = V_s - V$$

A partir de las cuales:

$$V = \frac{V_1 - V_2}{2}$$



# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Medición del viento:**

Generalidades:

Estos dispositivos tienen: Transductores, microprocesadores, unidades de memoria, etc..

En general las medidas se registran en intervalos de 10 minutos: valores máximos, mínimos, medios...

La calidad de las mediciones dependerá de las características del instrumento:

- ◆ Precisión,
- ◆ Resolución,
- ◆ Sensibilidad,
- ◆ Error,
- ◆ Velocidad de respuesta,
- ◆ Repetitividad,
- ◆ Confiabilidad

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**El viento:**

**Medición del viento:**

Dirección del viento:

También es un elemento importante, para por ejemplo, evitar las obstrucciones

La velocidad y la dirección se representan conjuntamente en la *rosa de los vientos*:

Un diagrama circular dividido en 8, 12 o 16 espacios iguales indicando los puntos cardinales e intermedios;

En la rosa se presentan 3 tipos de informaciones:

- ◆ Porcentaje del tiempo para el cual el viento provino de determinada dirección
- ◆ El producto de lo anterior y la velocidad media del viento
- ◆ El producto de lo anterior y el cubo de la velocidad

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

### **Análisis de datos de vientos:**

En general con los datos de un año es suficiente para evaluar el comportamiento del viento en un punto

Los equipos dan valores medios sobre un periodo de tiempo (en general 10 min)

Tales mediciones se agrupan y analizan con modelos y software para una estimación precisa de la disponibilidad de energía eólica

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**Análisis de datos de vientos:**

**Velocidad promedio del viento:**

La información más importante de la disponibilidad de viento en un punto es su velocidad promedio  $V_m$ :

$$V_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$$

Sin embargo el uso de la velocidad promedio para el cálculo de la potencia eólica no es lo acertado

Lo apropiado es el cálculo de las potencias para cada intervalo y promediar tales potencias

Para cálculos de energía eólica la velocidad debería ser ponderada por su contenido de potencia para calcular el promedio. La velocidad del viento promedio será:

$$V_m = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^3 \right)^{1/3}$$

# ENERGÍA EÓLICA (EE)

## ANÁLISIS DE LOS REGÍMENES DE VIENTO

**Análisis de datos de vientos:**

**Distribución de la velocidad del viento:**

Además de la fuerza promedio del viento sobre un período, su distribución es un factor crítico para la evaluación del recurso

Dos turbinas instaladas en dos puntos con la misma velocidad del viento promedio puede entregar diferentes potencias debido a diferencias en la distribución de velocidades