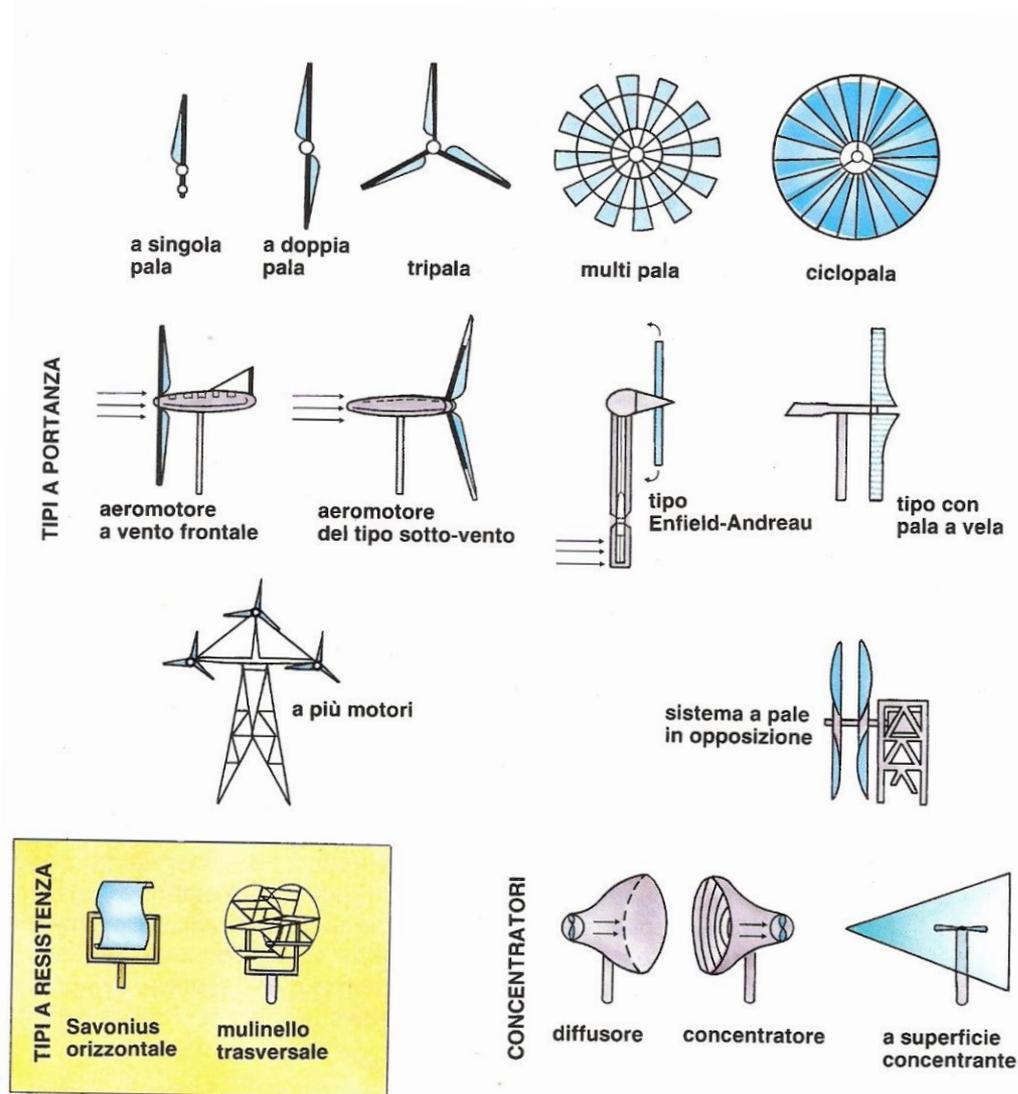




# Tipi di turbine – Asse orizzontale



# Tipi di turbine – Asse verticale

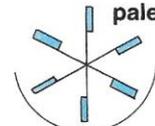
TIPI A RESISTENZA  
PREVALENTE



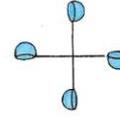
Savonius



Savonius  
multi pala

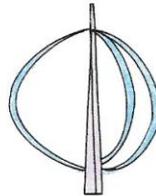


schermatura

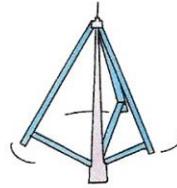


sistema  
a coppette

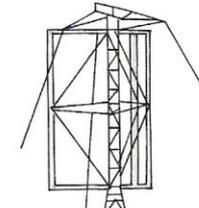
TIPI A PORTANZA  
PREVALENTE



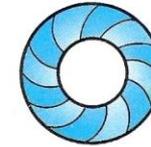
Darrieus  
normale



Darrieus

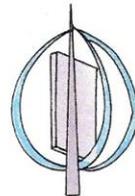


Giromill



turbina

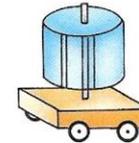
MISTI



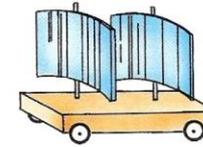
Savonius-Darrieus



Savonius  
eccentrico

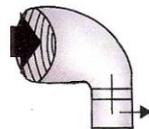


Magnus

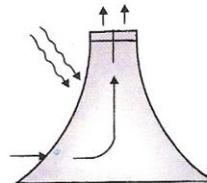


a profilo

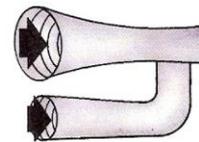
ALTRI



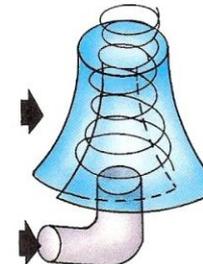
concentratore a  
gradiente termico



deflettore

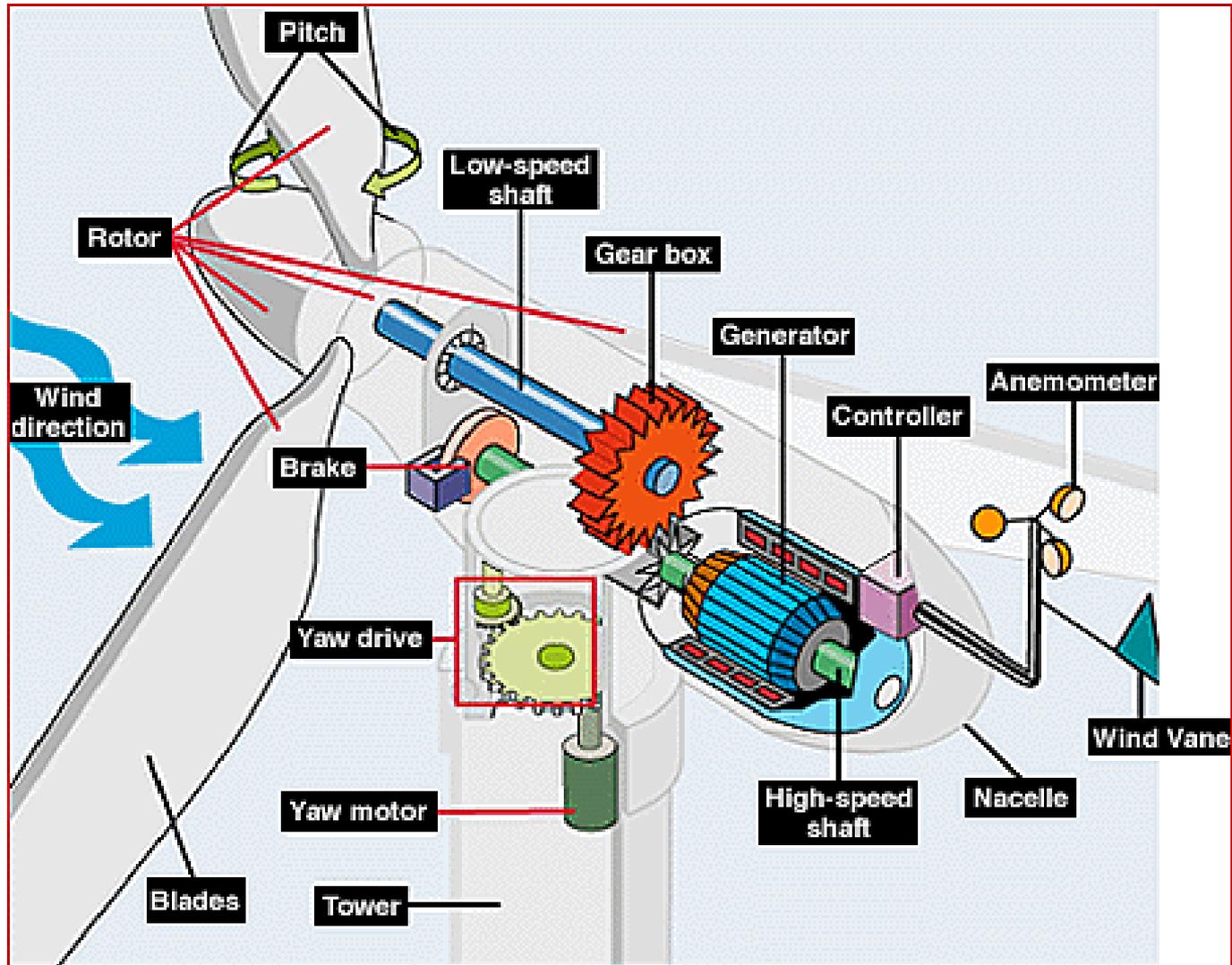


Venturi



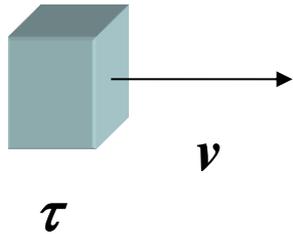
concentratore  
a vortice

# Schema di un Aerogeneratore - 1



# Principi Fisici - 1

$W_\tau = \text{energia cinetica di un elemento di fluido in moto [J]}$



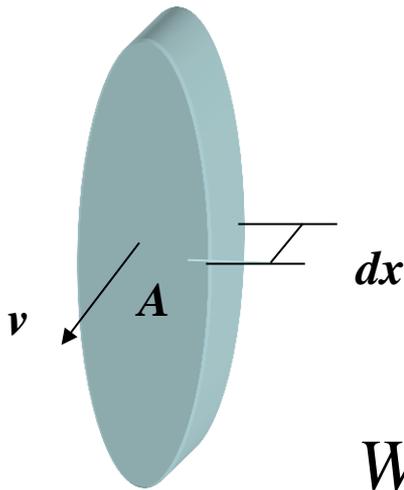
$$W_\tau = \frac{1}{2} \rho \tau v^2$$

$\rho = \text{densità di massa [kg/m}^3\text{]},$   
 $\tau = \text{volume dell'elemento di fluido [m}^3\text{]}$

$Q = \text{portata in volume di un fluido attraverso una superficie [m}^3\text{/s]}$

$$Q = A v$$

$A = \text{sezione della superficie [m}^2\text{]}$   
 $v = \text{componente della velocità del}$   
 $\text{fluido normale alla superficie [m/s]},$



$W = \text{potenza, legata alla energia cinetica,}$   
 $\text{trasportata da un fluido in moto}$   
 $\text{attraverso una superficie [W]}$

$$W = Q \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

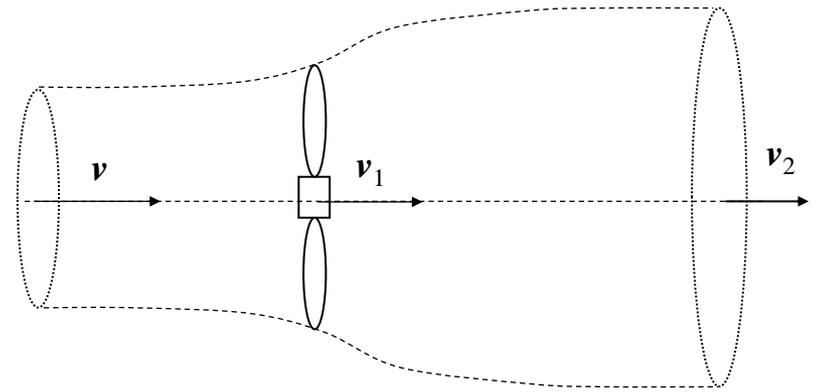
**La potenza dipende dal cubo della velocità**

$$\tau = A \Delta x = A v \Delta t$$

# Principi Fisici - 2

## Distribuzione di velocità

- moto laminare
- fluido incomprimibile
- interazione nulla col fluido confinante



## Potenza ceduta dal vento alla turbina

$$P = Q \frac{1}{2} \rho (v^2 - v_2^2)$$

$$Q = A v = A_r v_1 = A_2 v_2$$



$$P = \frac{1}{2} \rho A_r v_1 (v^2 - v_2^2)$$

# Principi Fisici - 3

## Condizione di massima potenza estraibile (teorema di Betz)

$$T = \rho v_1 A_r (v - v_2) \quad T = \text{Spinta esercitata dal vento sul rotore}$$

$$P = \rho A_r v_1 \left( \frac{v^2 - v_2^2}{2} \right) \quad P = \text{potenza meccanica ceduta dal vento}$$

$$P = T v_1 \quad \longrightarrow \quad v_1 = \frac{v + v_2}{2}$$

$$P = \rho A_r \frac{v + v_2}{2} \left( \frac{v^2 - v_2^2}{2} \right)$$

$$\frac{dP}{dv_2} = 0 \quad \longrightarrow \quad v_2 = \frac{v}{3}, \quad v_1 = \frac{2v}{3}, \quad P_{\max} = \frac{16}{27} \frac{\rho A_r v^3}{2}$$

# Principi Fisici - 4

## Potenza massima estraibile

$$P_{\max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho A_r v^3$$

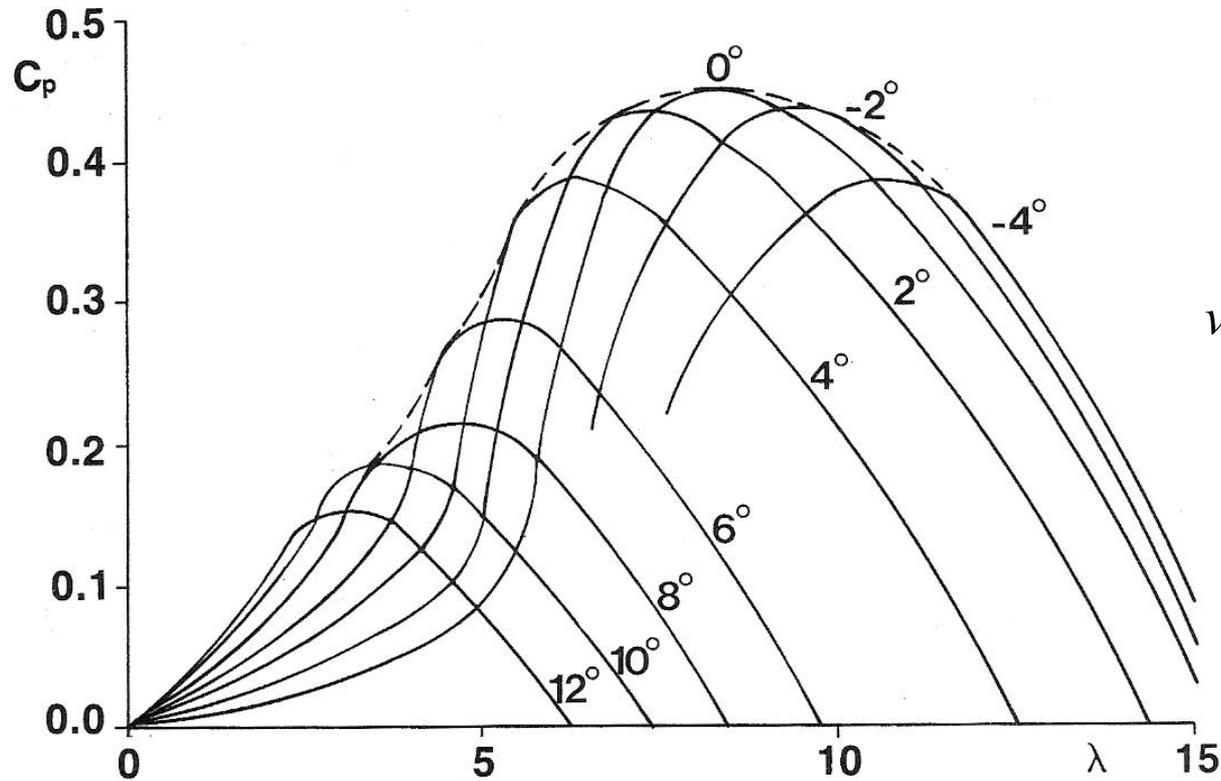
## Coefficiente di Potenza (Prestazione)

$$C_p = \frac{\text{Potenza estratta}}{\text{Potenza disponibile}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_r v^3}$$

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} \quad (59.3 \%)$$

# Prestazione delle turbine - 1

Turbina a tre pale



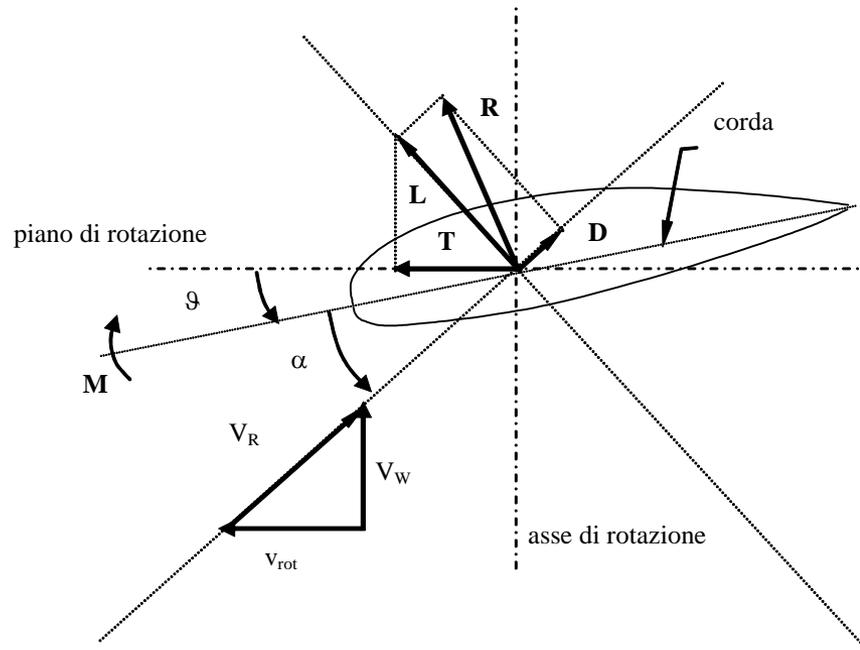
$$\lambda = \frac{v_p^{\max}}{v} = \frac{\omega R}{v}$$

$v_p^{\max}$  = massima velocità della pala

$\omega$  = velocità angolare di rotazione

**Andamento del coefficiente di potenza ( $C_p$ ) al variare del parametro  $\lambda$  per diversi valori dell'angolo di calettamento**

# Prestazione delle turbine - 2



$\theta$  = angolo di calettamento (pitch angle), angolo fra la corda della pala ed il piano normale all'asse di rotazione

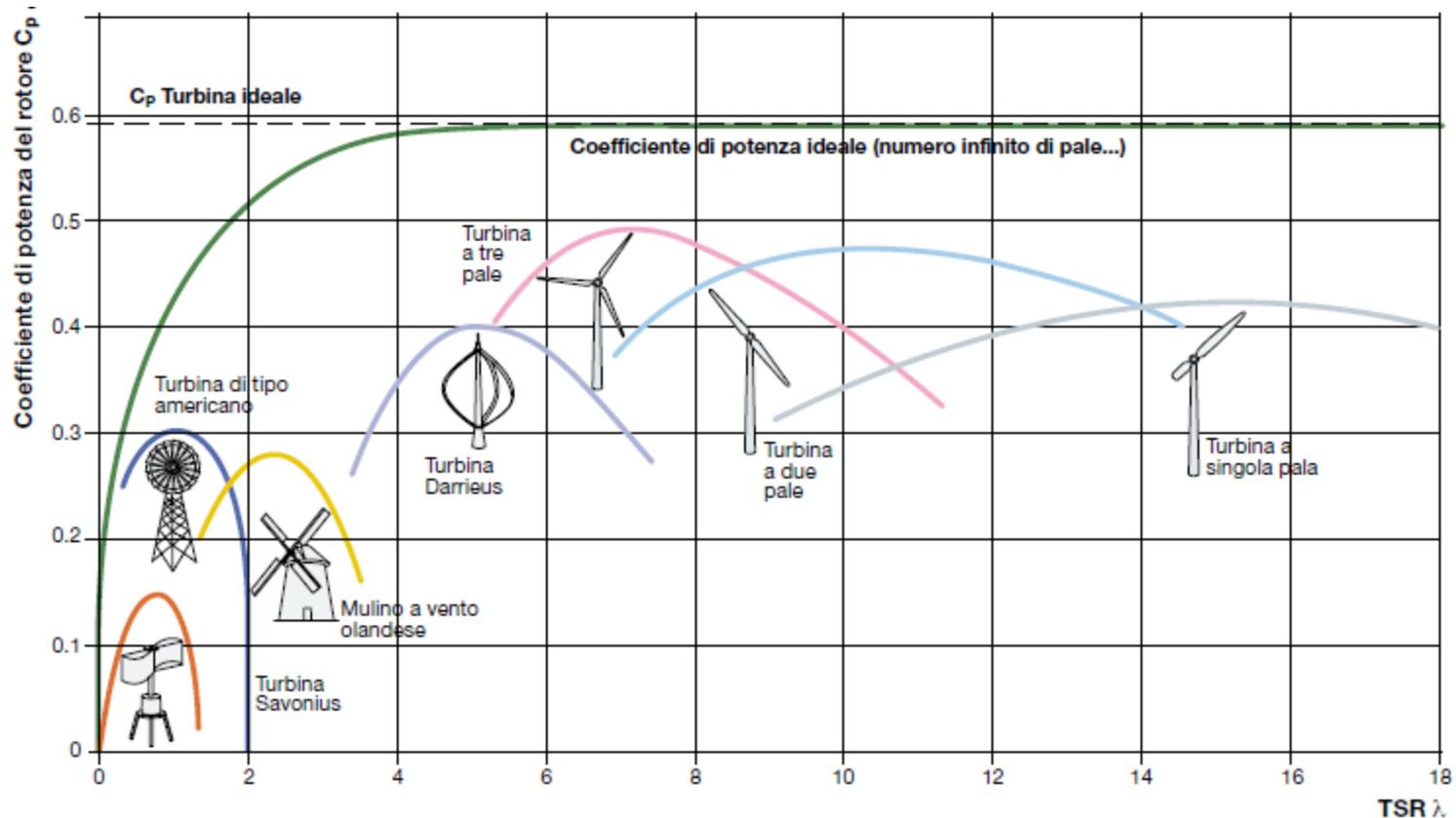
$v_w$  = velocità del vento

$\omega$  = velocità angolare della pala,  $R$  = raggio della pala

$v_R$  = velocità del vento rispetto alla pala =  $\omega R$

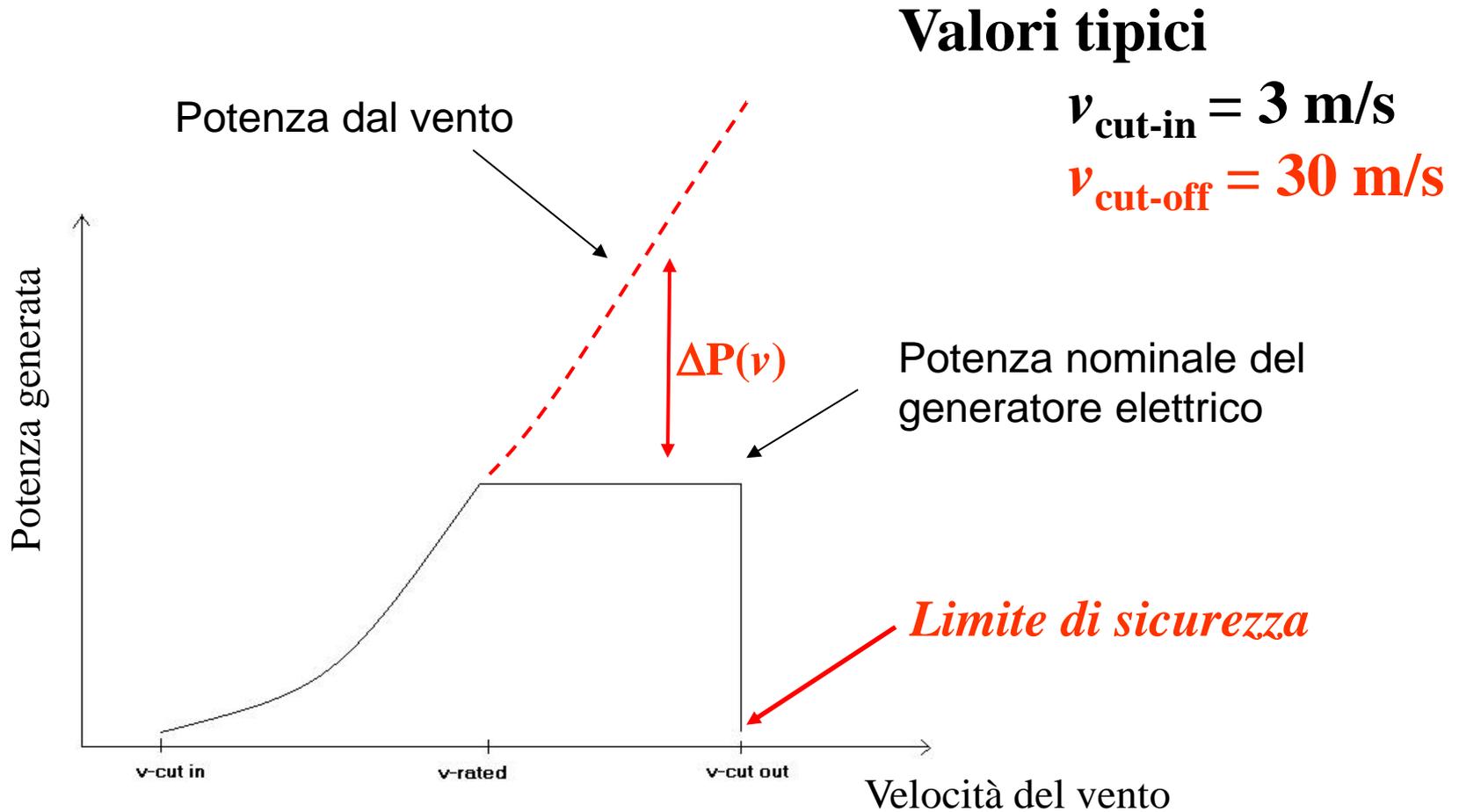
$\alpha$  = angolo di attacco, angolo fra la velocità del vento rispetto alla pala e la corda della pala

# Prestazione delle turbine - 3



**Andamento del coefficiente di potenza massimo ( $C_p$ ) al variare del parametro  $\lambda$  per diversi tipi di turbina**

# Regolazione (controllo) della potenza - 1



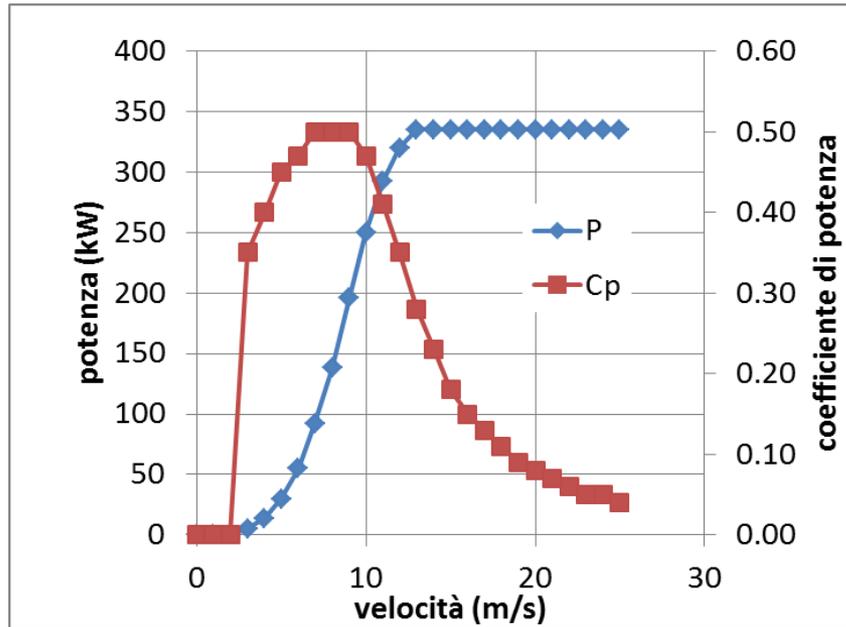
## Valori tipici

$$v_{\text{cut-in}} = 3 \text{ m/s}$$

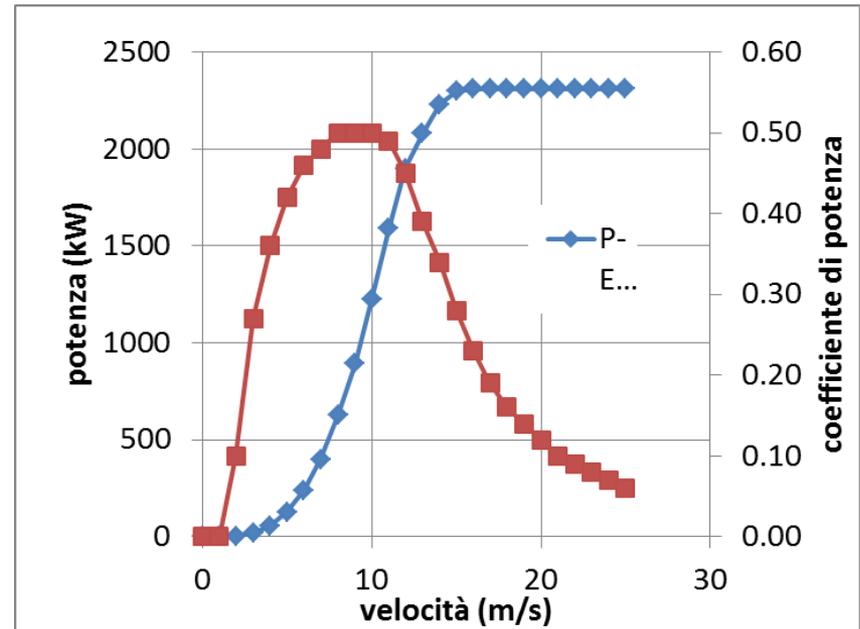
$$v_{\text{cut-off}} = 30 \text{ m/s}$$

# Regolazione (controllo) della potenza - 2

E33



E70



- Quando la velocità del vento è minore di quella nominale, il sistema di controllo agisce per massimizzare la potenza estratta (variazione della velocità della turbina)
- Quando la velocità del vento è maggiore di quella nominale il sistema di controllo agisce per ridurre la coppia aerodinamica (controllo dell'angolo di pitch, stallo)

# Regolazione della potenza - 3

$$P = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho A_r v^3 \quad v \leq v_{\text{nominale}}$$

$$P = P_n \quad v_{\text{nominale}} \leq v \leq v_{\text{cut-out}}$$

## Parametri di regolazione

*Angolo di calettamento (Pitch control),*

*Velocità di rotazione*

*Imbardata (Yaw control)*

$$P = c_p \cdot \frac{1}{2} \rho A_r v^3$$

*Velocità del vento*

*Solidità (area effettiva) del rotore controvento*

*Densità dell'aria*

*Coefficiente di potenza*

# Imbardata

**Disallineamento dell'asse  
rispetto alla direzione del vento**



**Passiva (banderuola)**

**Attiva (elettrica e/o idraulica)**

# Imbardata passiva

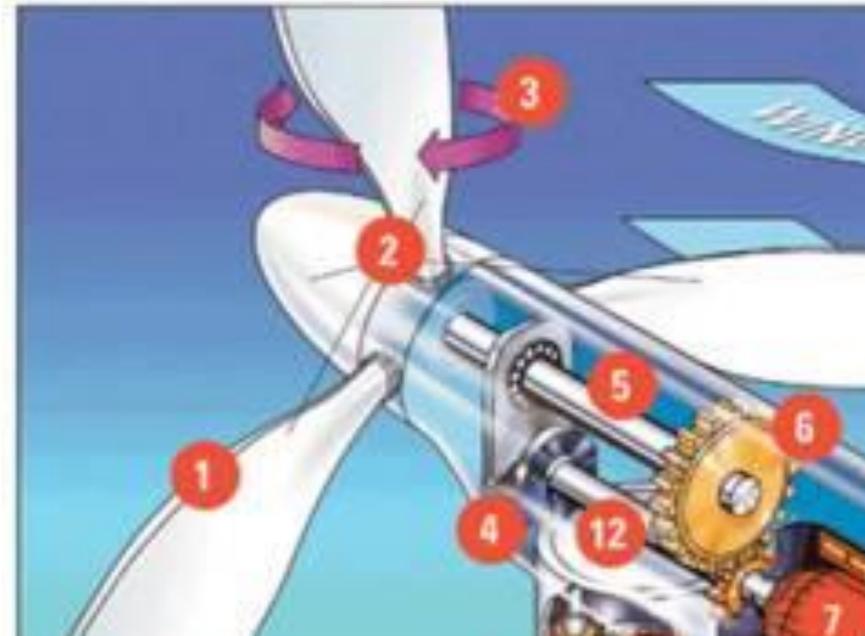


# Imbardata attiva – dinamiche lente



# Blade Pitch Control

Angolo di calettamento  
della pala

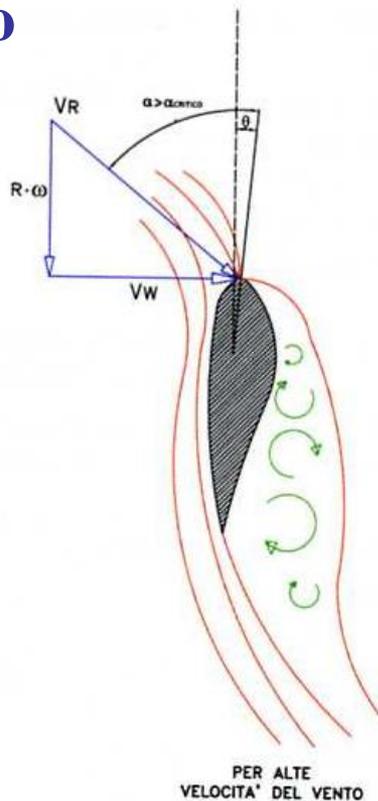
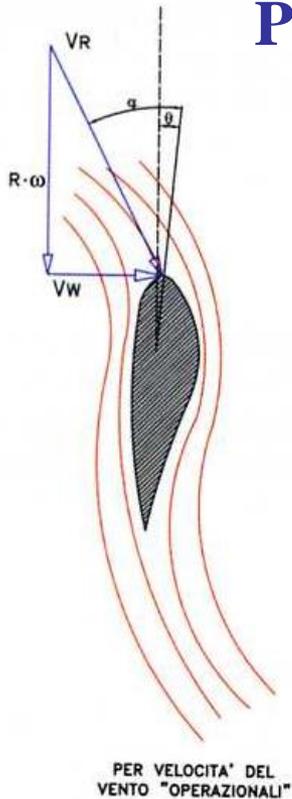


**Passiva** (stallo)

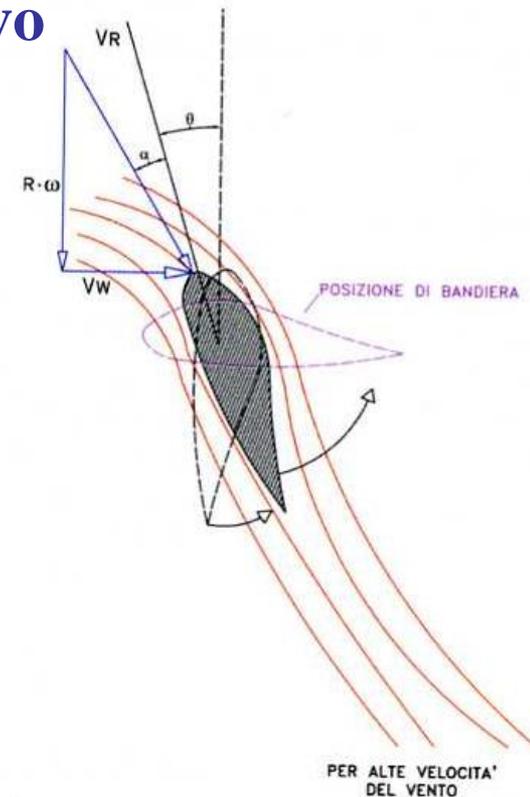
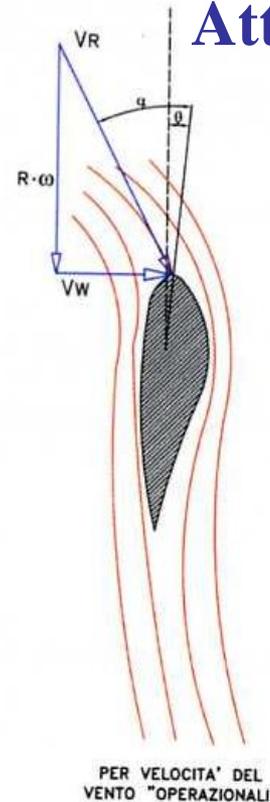
**Attiva** (elettrica e/o idraulica - retroazionata)

# Pitch Control

## Passivo



## Attivo



$\theta$  = angolo di calettamento (pitch angle), angolo fra la corda della pala ed il piano normale all'asse di rotazione

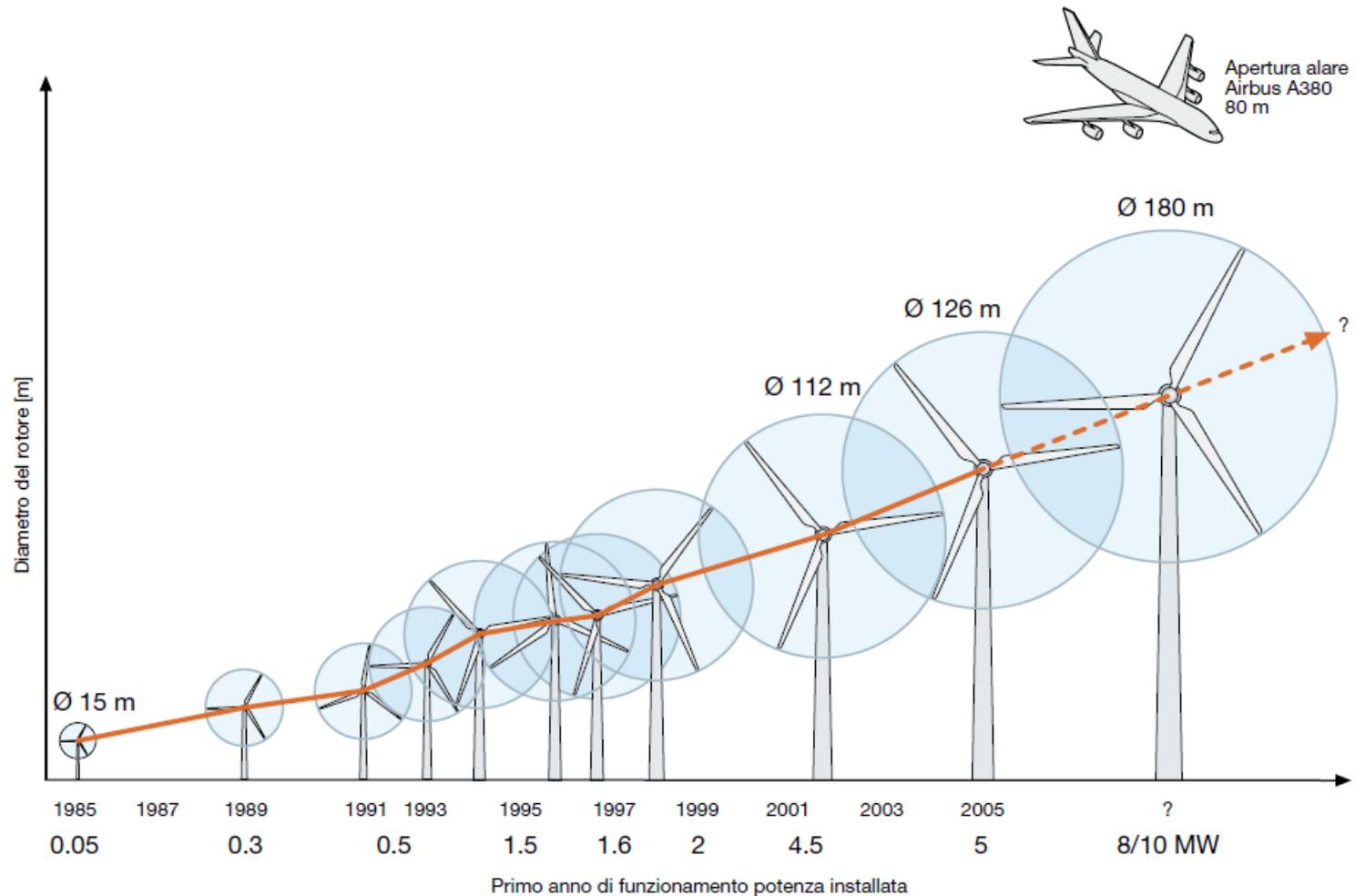
$V_w$  = velocità del vento

$\omega$  = velocità angolare della pala

$V_R$  = velocità del vento rispetto alla pala

$\alpha$  = angolo di attacco, angolo fra la velocità del vento rispetto alla pala e la corda della pala

# Evoluzione della potenza e delle dimensioni dei generatori eolici



Le macchine elettriche utilizzate nei generatori eolici sono;

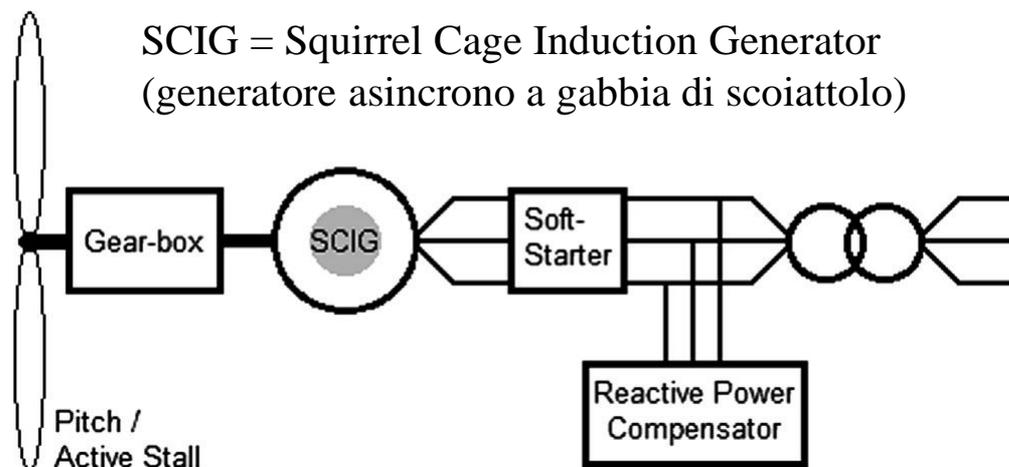
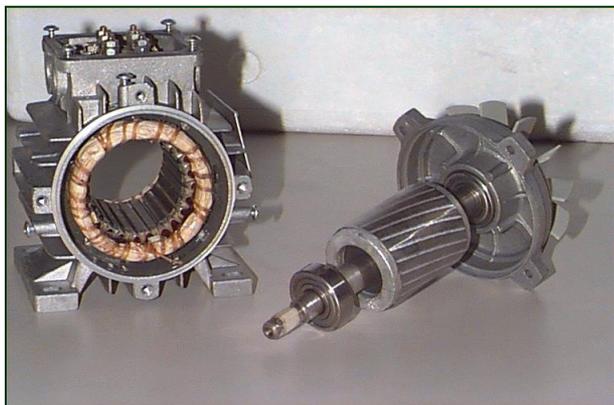
**Generatori sincroni:** sono realizzati o con magneti permanenti o con il rotore avvolto e sono collegati alla rete mediante un convertitore in modo da poter funzionare a velocità variabile

**Generatori asincroni:** sono realizzati o con il rotore a gabbia di scoiattolo o con il rotore avvolto,

- direttamente connessi alla rete e funzionanti quindi a velocità costante
- connessi alla rete mediante un convertitore in modo da funzionare a velocità variabile. Il convertitore può essere collegato al circuito di statore, ma preferibilmente viene collegato sul circuito di rotore (**macchina asincrona a doppia alimentazione**)

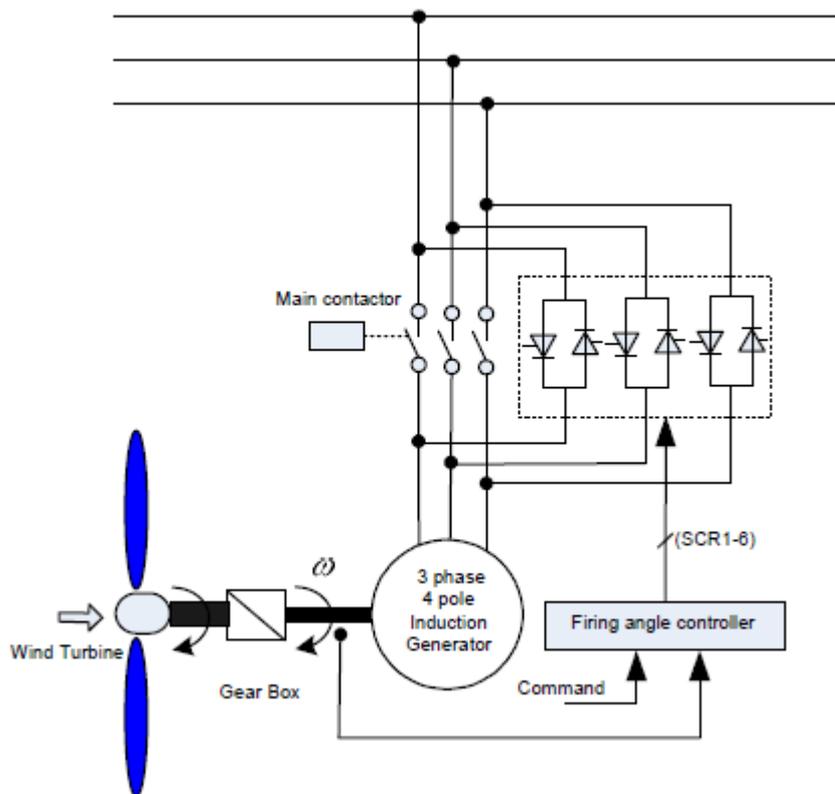
Le variazioni delle condizioni del vento avvengono su tempi lunghi rispetto alle costanti di tempo caratteristiche dei generatori e per la regolazione del sistema si può fare riferimento alla caratteristica elettromeccanica dei generatori a regime

# Generatore asincrono con connessione diretta



- La macchina asincrona a gabbia di scoiattolo funziona da generatore per velocità di rotazione superiori a quella di sincronismo:  $n_c = \frac{60f}{p}$  ( $p$  = numero di coppie di poli). La regione di funzionamento stabile permette variazioni di velocità piccole ( $s=2\%$ ) rispetto alla velocità di sincronismo
- Il generatore asincrono assorbe potenza reattiva di tipo induttivo. Il compensatore di potenza reattiva è un banco di condensatori che riduce la potenza reattiva assorbita dalla rete. A causa del magnetismo residuo il generatore asincrono può autoeccitarsi (fenomeno che gli permette di operare alimentando un carico isolato ma è da evitare per problemi di sicurezza nel collegamento alla rete)

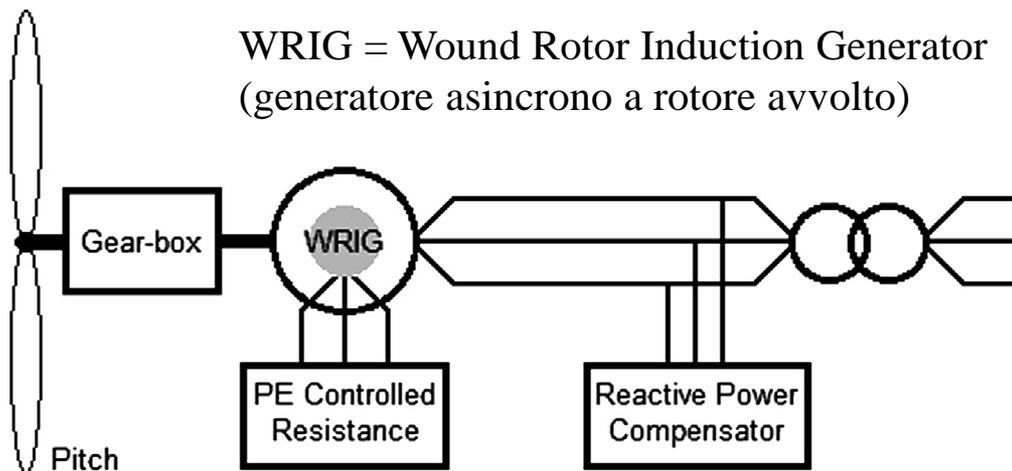
# Generatore asincrono con connessione diretta



“Phase Control Thyristor Based Soft-starter for a Grid Connected Induction Generator for Wind Turbine System”, S. Tunyasirut, B. Wangsilabatra, T. Suksri, International Conference on Control, Automation and Systems 2010

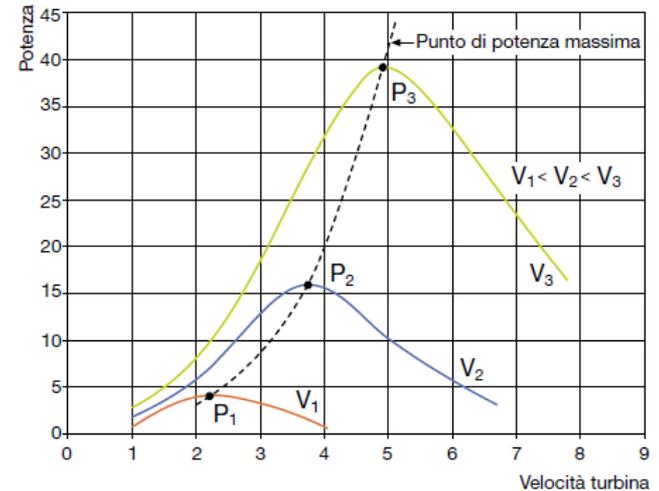
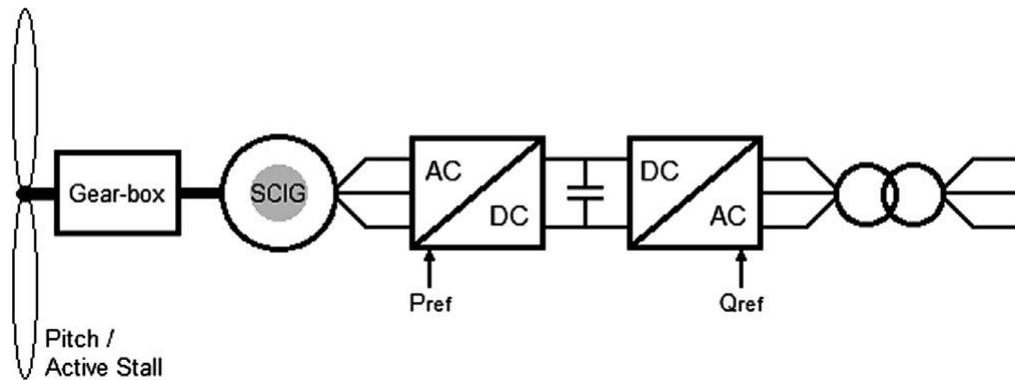
- Durante la fase di avviamento il generatore asincrono si comporta da motore ed assorbe una corrente di spunto sensibilmente maggiore di quella nominale. Il «soft starter» è un dispositivo per ridurre la corrente all’avviamento. Una alternativa è collegare alla rete il generatore solo dopo che il vento lo ha portato alla velocità di sincronismo (per fare ciò è necessario avere il controllo dell’angolo di pitch)

# Generatore asincrono con connessione diretta



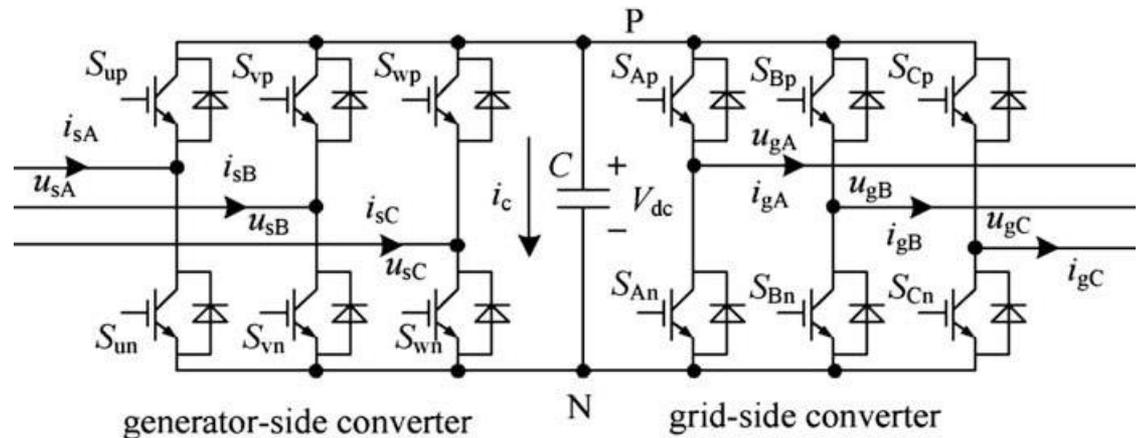
- Quando la macchina asincrona ha il rotore avvolto, mediante un collettore ad anelli si può collegare in serie agli avvolgimenti di rotore una stella di resistori (reostato) la cui resistenza viene controllata elettronicamente. E' così possibile ridurre le correnti di spunto e variare leggermente la velocità di rotazione ( $s = 0-10\%$ )

# Generatore asincrono connesso alla rete mediante un convertitore

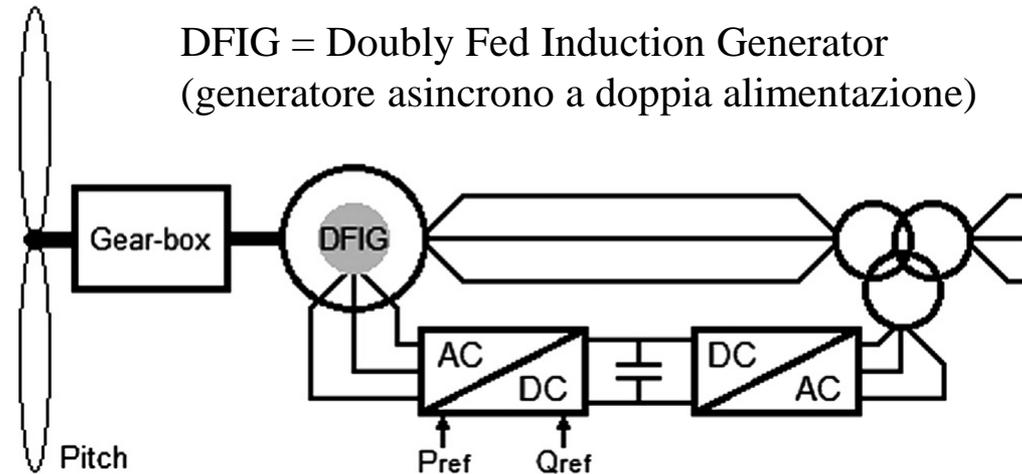


- Mediante l'introduzione di un convertitore elettronico è possibile disaccoppiare la frequenza del generatore da quella della rete, consentendo alla turbina di operare alla velocità di massimo rendimento

- Il convertitore (back-to-back PWM) permette il controllo della potenza reattiva

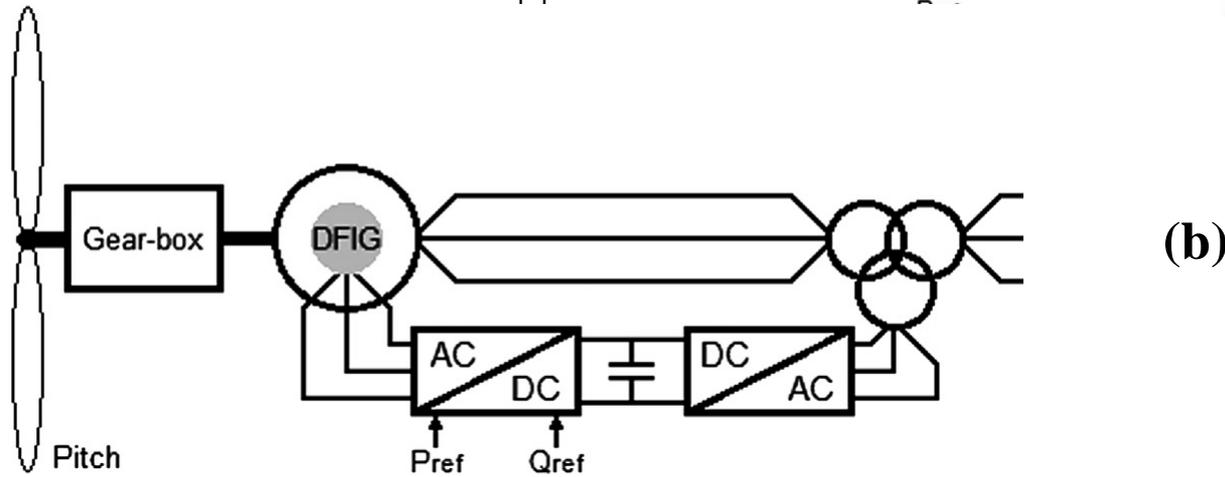
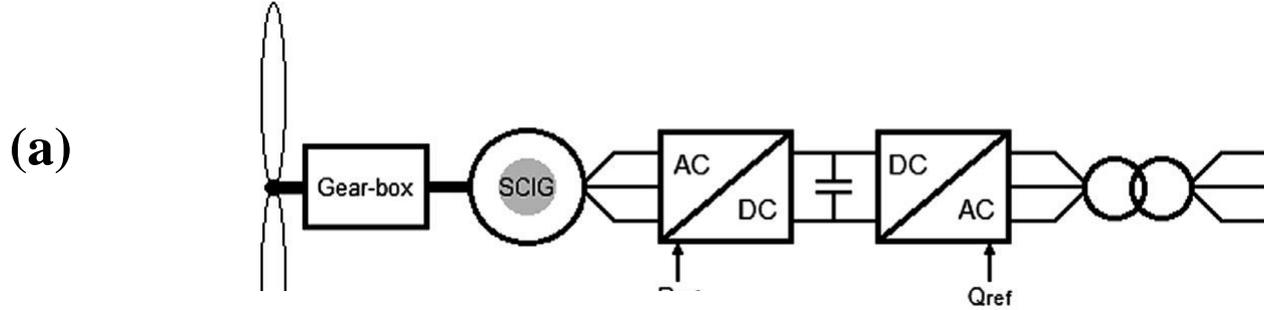


# Generatore asincrono a doppia alimentazione



- Alimentando il rotore, collegandolo alla rete mediante un convertitore, si può controllare la frequenza delle correnti di rotore; si può quindi controllare la velocità di rotazione del rotore (e di conseguenza della turbina) con una variazione massima di circa il  $\pm 30\%$  della velocità di sincronismo
- E' possibile fare funzionare la macchina asincrona a doppia alimentazione da generatore anche a velocità minori di quella di sincronismo (in tali condizioni il rotore assorbe potenza dalla rete mentre eroga potenza alla rete quando la macchina opera da generatore a velocità supersincrona)
- E' possibile controllare la potenza reattiva.

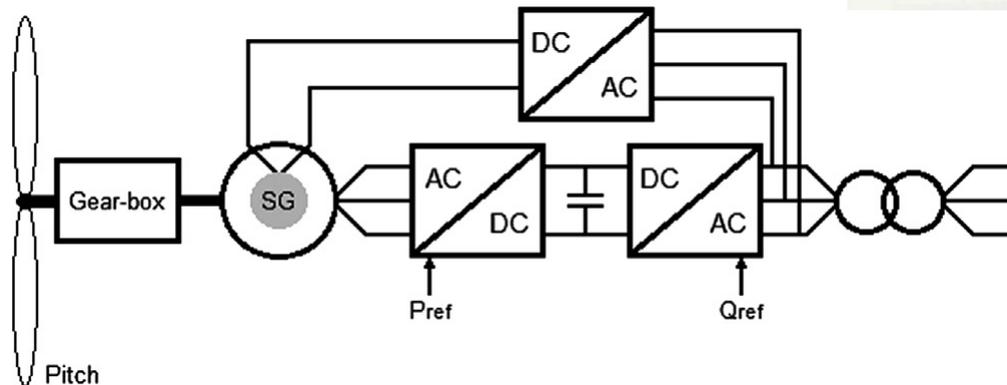
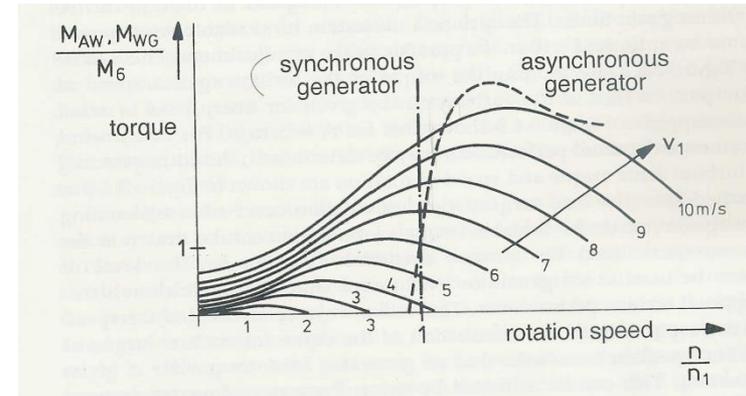
# Generatore asincrono a velocità variabile



La soluzione (b) di solito viene preferita alla soluzione (a) in quanto, anche se il campo di variazione della velocità è minore, risulta notevolmente minore (20-30 %) la potenza che attraversa il convertitore e di conseguenza risultano notevolmente minori il suo costo e le sue perdite.

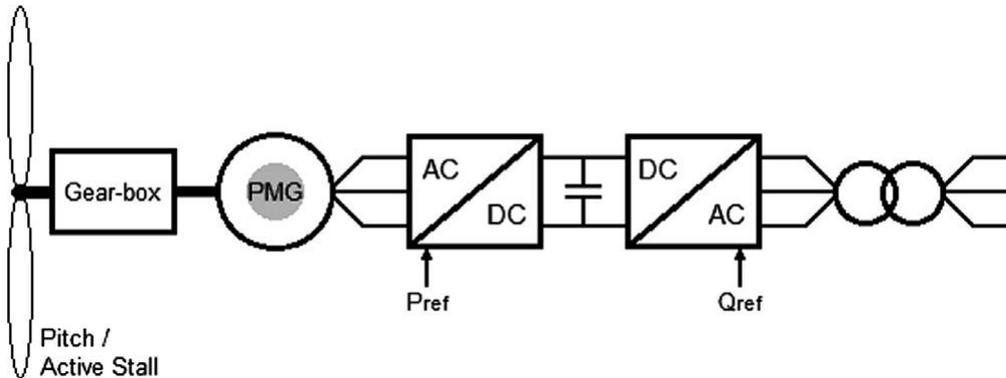
# Generatore sincrono, con rotore avvolto, connesso alla rete mediante un convertitore

La connessione diretta del generatore sincrono alla rete non viene utilizzata perché, a causa della costanza della velocità, in condizioni di violente raffiche di vento, il generatore viene sottoposto a sollecitazione meccaniche troppo elevate

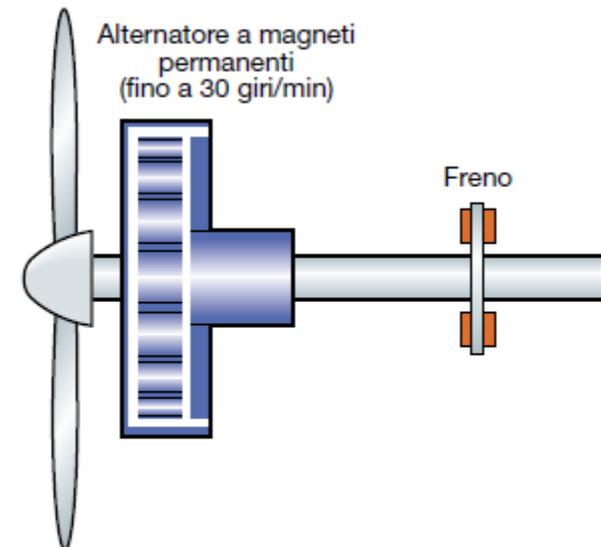


- Si utilizza un convertitore back-to-back per controllare la frequenza del generatore sincrono al variare della velocità del vento. Questa soluzione permette la maggiore variazione della velocità della turbina ed è quindi la più efficiente per la realizzazione delle condizioni di massimo rendimento.
- Viene usato un convertitore per controllare la corrente di eccitazione

# Generatore sincrono, con magneti permanenti, connesso alla rete mediante un convertitore



- La macchina con eccitazione mediante magneti permanenti può essere realizzata con diametri sufficientemente grandi in modo da consentire velocità di rotazione del rotore fino a 30 giri/minuto e consentire quindi **l'accoppiamento diretto del generatore sincrono alla turbina senza uso di riduttore di giri.**



# Calcolo della energia prodotta - 1

valore medio

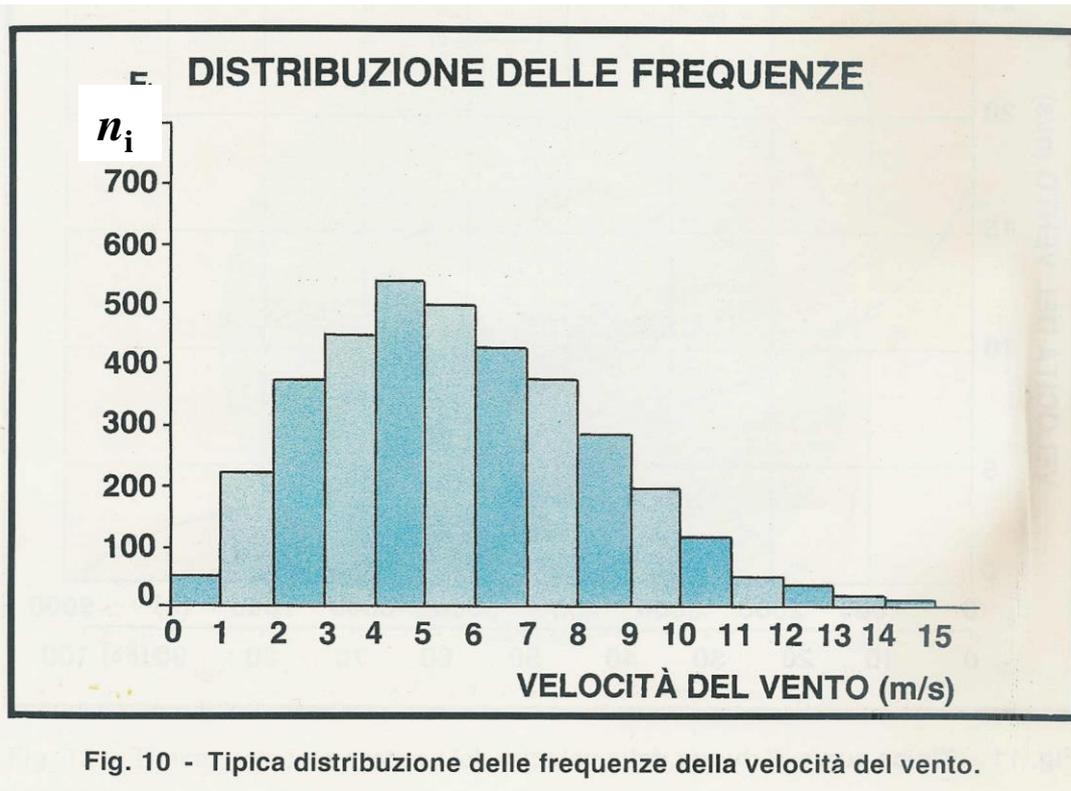
$$\langle v \rangle = \sum_i \frac{n_i}{N} v_i$$

Scarto quadratico medio

$$\sigma = \sqrt{\sum_i \frac{n_i}{N-1} (v_i - \langle v \rangle)^2}$$

Frequenza della velocità  $v_i$  : probabilità che il vento abbia una velocità compresa nell'intervallo di ampiezza  $\Delta v$  centrato su  $v_i$

$$f(v_i) = \frac{n_i}{N}$$

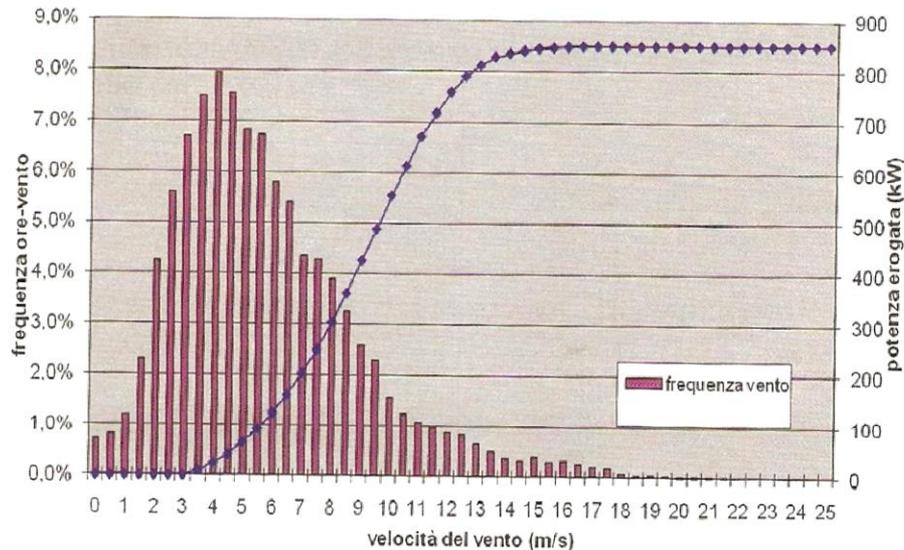


$N$  numero complessivo di rilevazioni

$n_i$  numero di occorrenze della velocità  $v_i$

# Calcolo della energia prodotta - 2

## Calcolo dell'energia prodotta in un anno (AEP)



$$AEP = \sum_i f(v_i) P(v_i) 8760$$

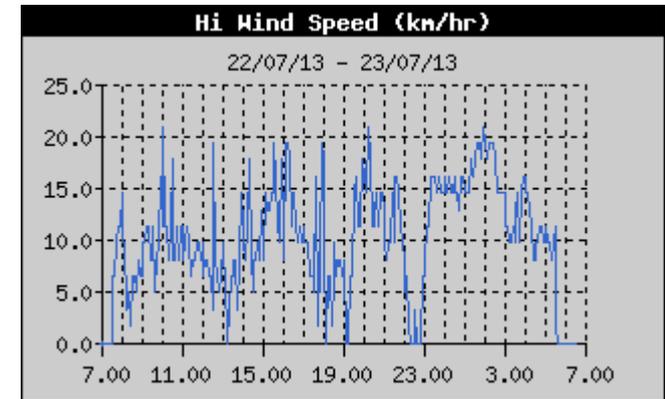
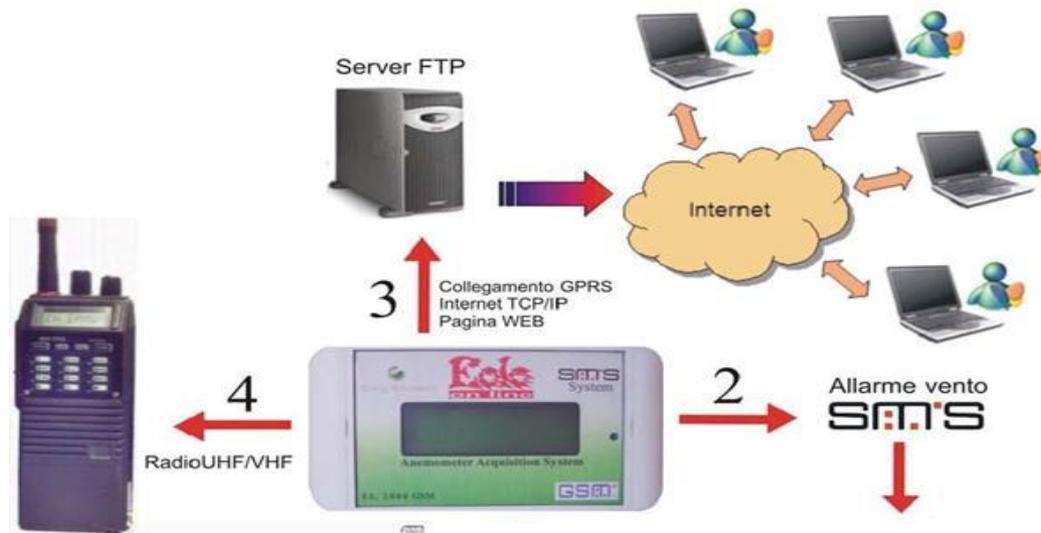
$P(v_i)$  = potenza (kW) erogata dal generatore eolico in corrispondenza della velocità del vento  $v_i$

8760 = numero di ore in un anno

AEP = energia prodotta in un anno (kWh/anno)

# Potenziale Eolico -1

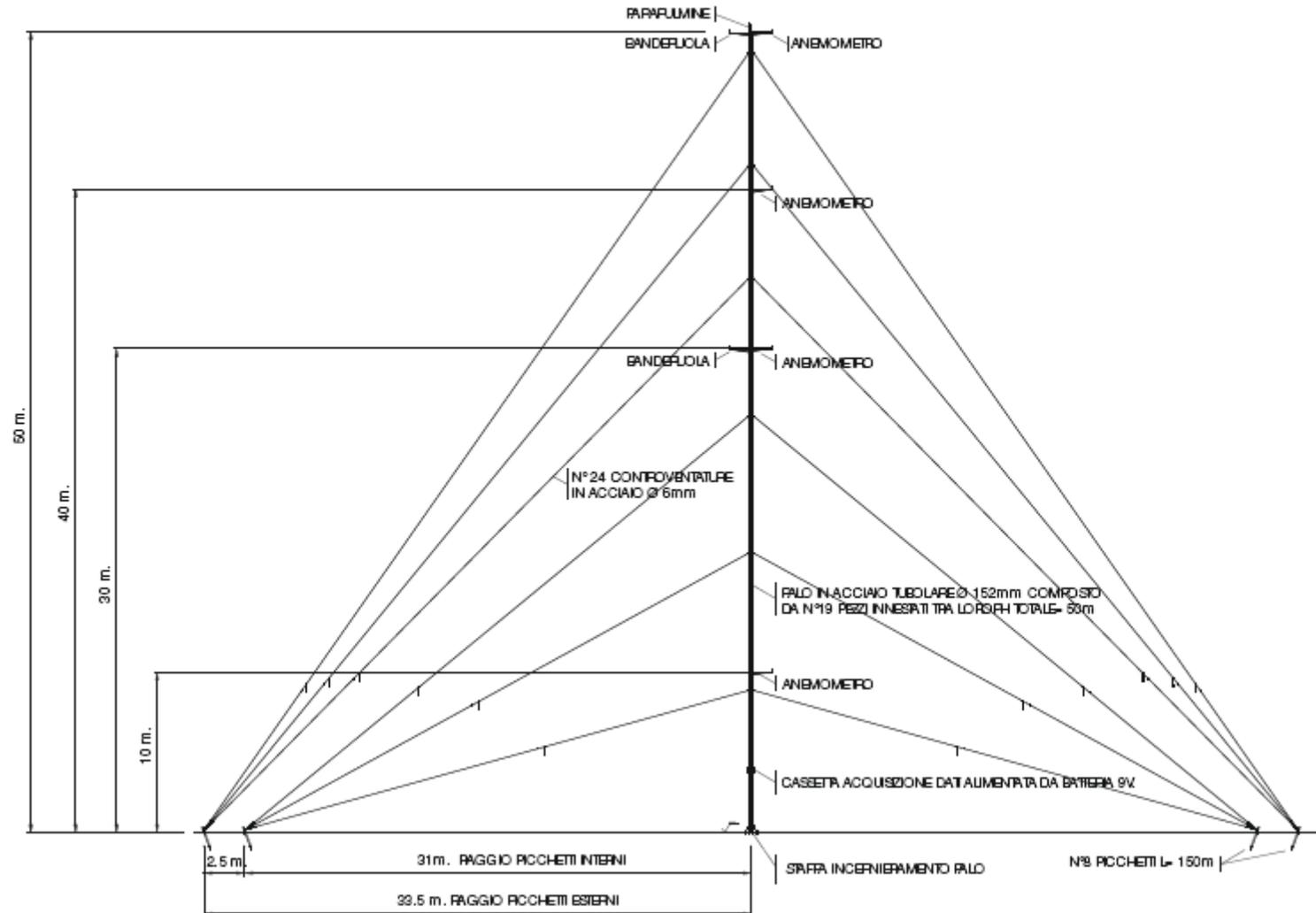
## Rilevazione dati mediante Stazione Anemometrica



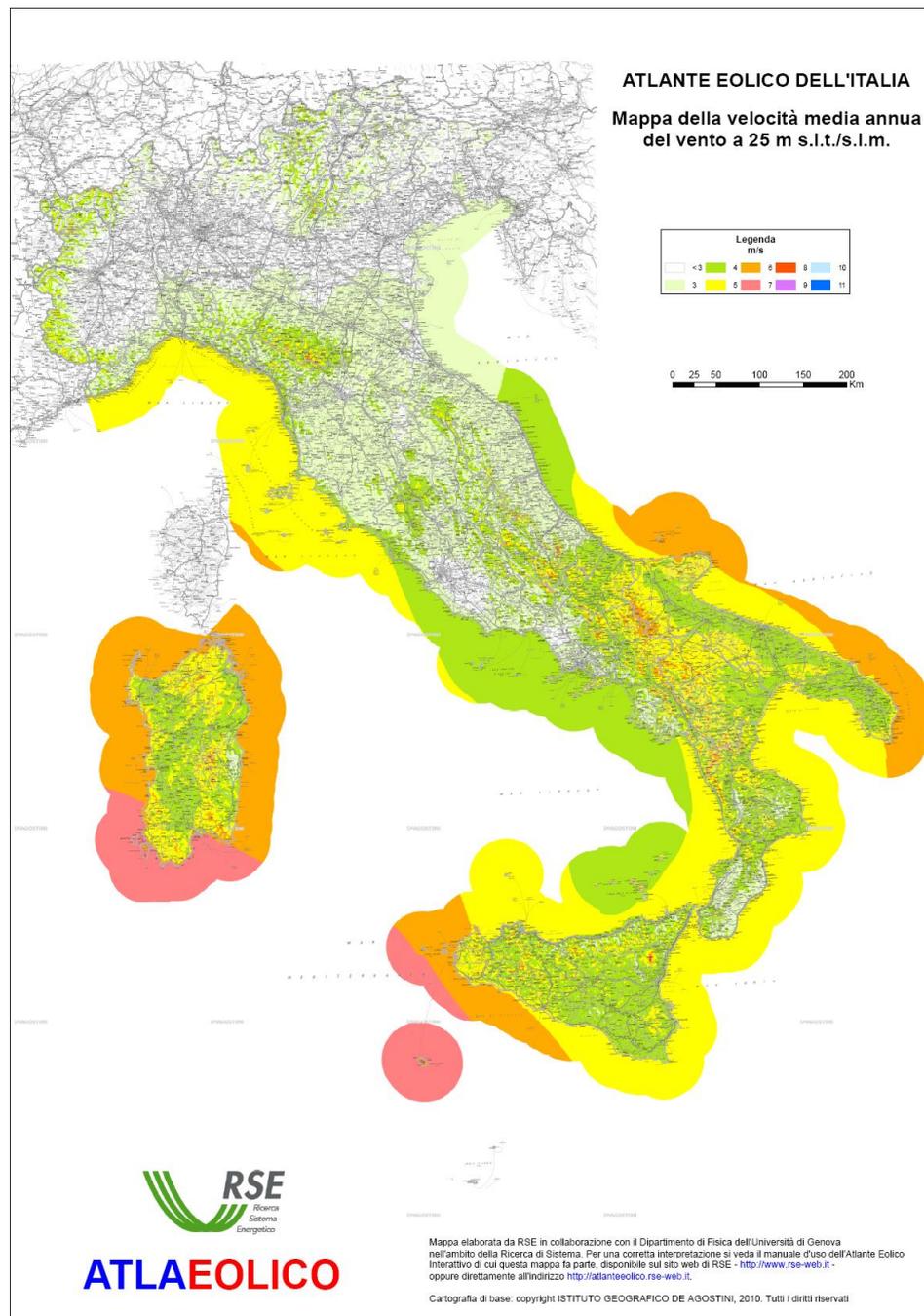
Sonda anemometrica e di temperatura

# Potenziale Eolico -2

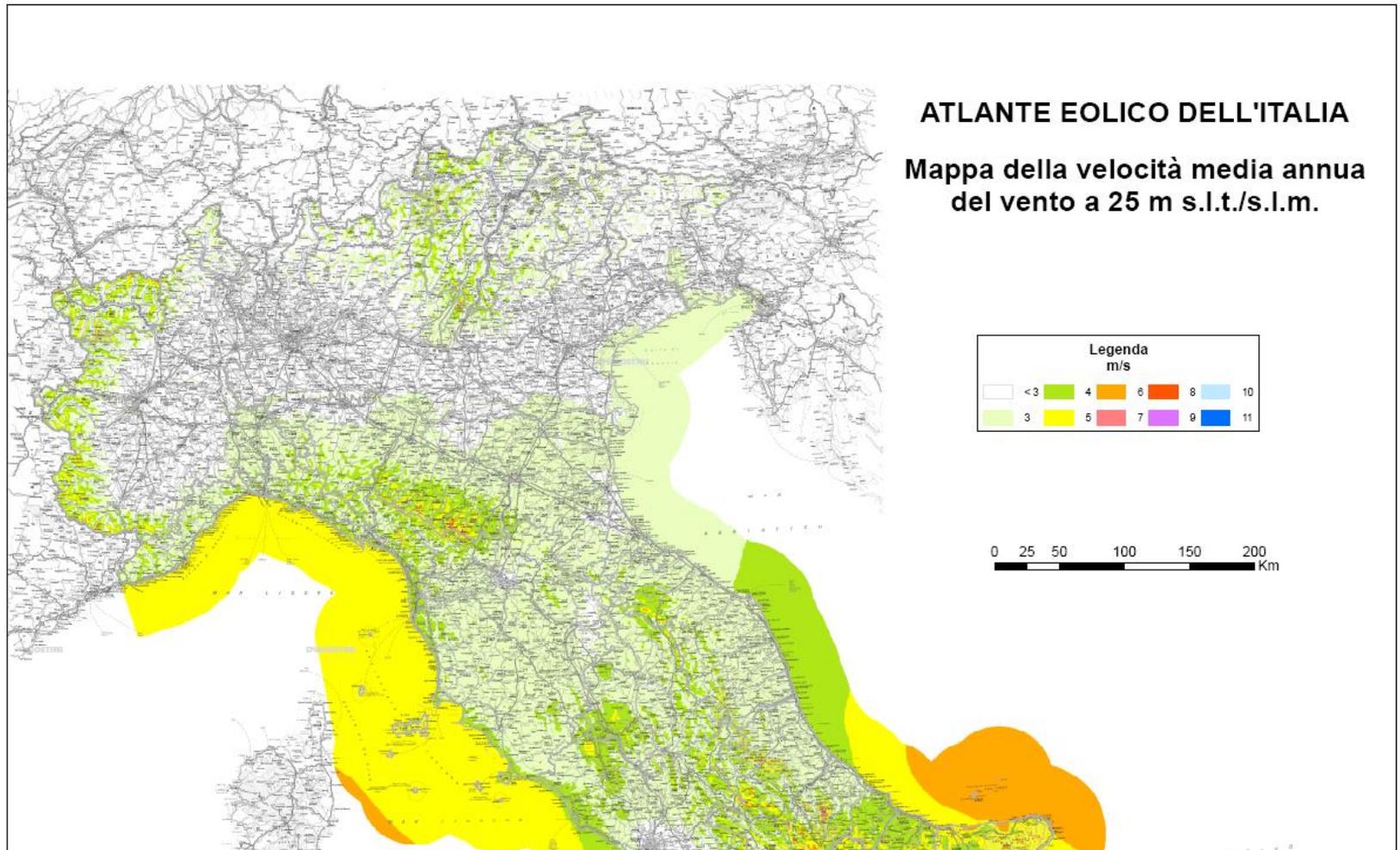
SCHEMA TORRE ANEMOMETRICA ALTEZZA 50m.



# Potenziale Eolico - 5

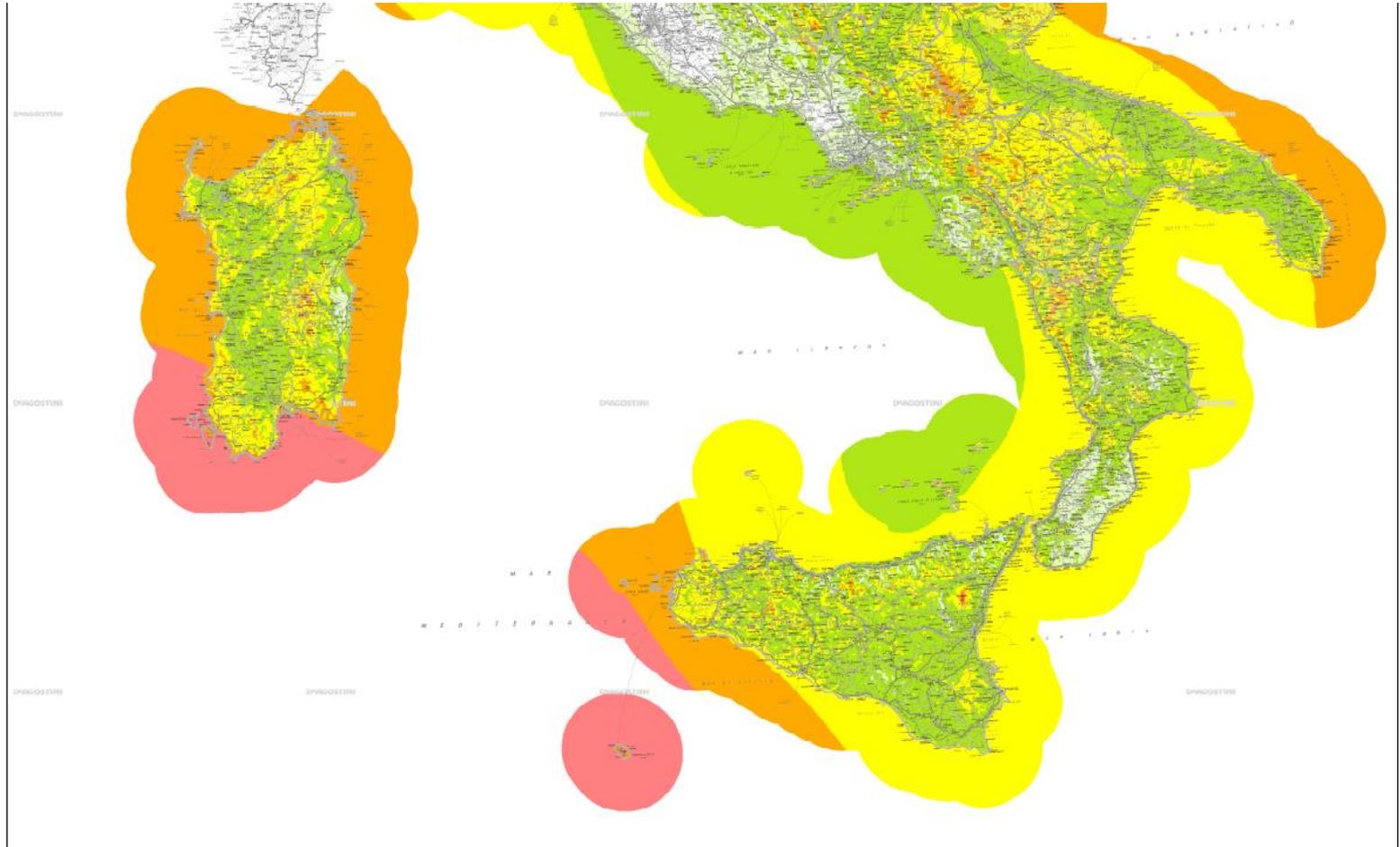


# Potenziale Eolico - 6



<http://atlanteolico.rse-web.it/viewer.htm>

# Potenziale Eolico - 7



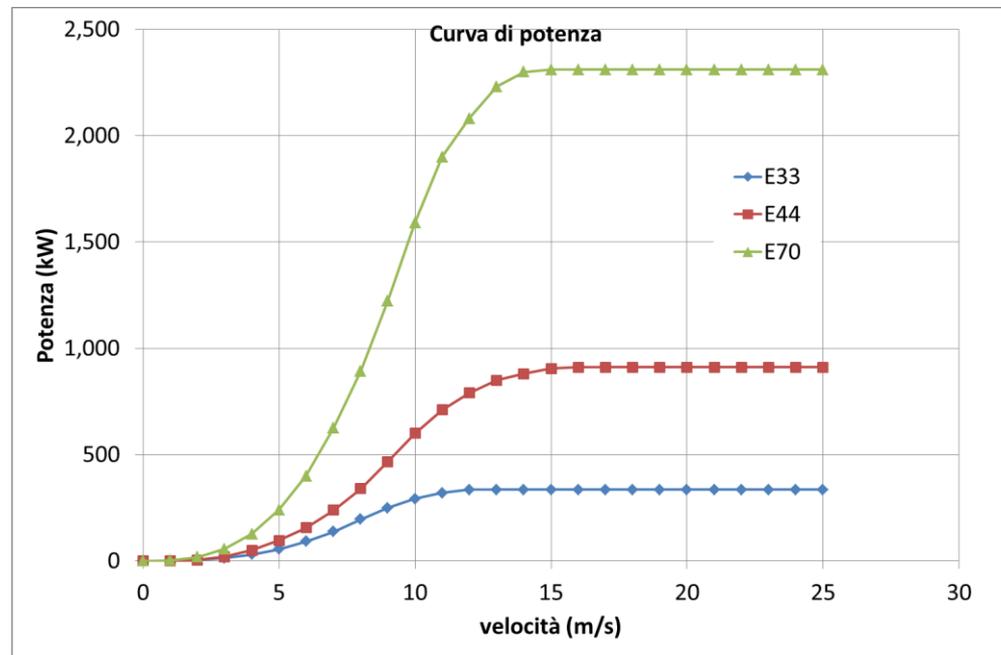
<http://atlanteolico.rse-web.it/viewer.htm>

# Esempio di calcolo dell'energia prodotta in un anno - 1

ENERCON E33:  $P_n = 330$  kW,  $D = 33.4$  m,  $H = 37/44/49/50$  m

ENERCON E44:  $P_n = 900$  kW,  $D = 44$  m,  $H = 45/55/65$  m

ENERCON E70:  $P_n = 2300$  kW,  $D = 71$  m,  $H = 57/84/85/98/113$  m



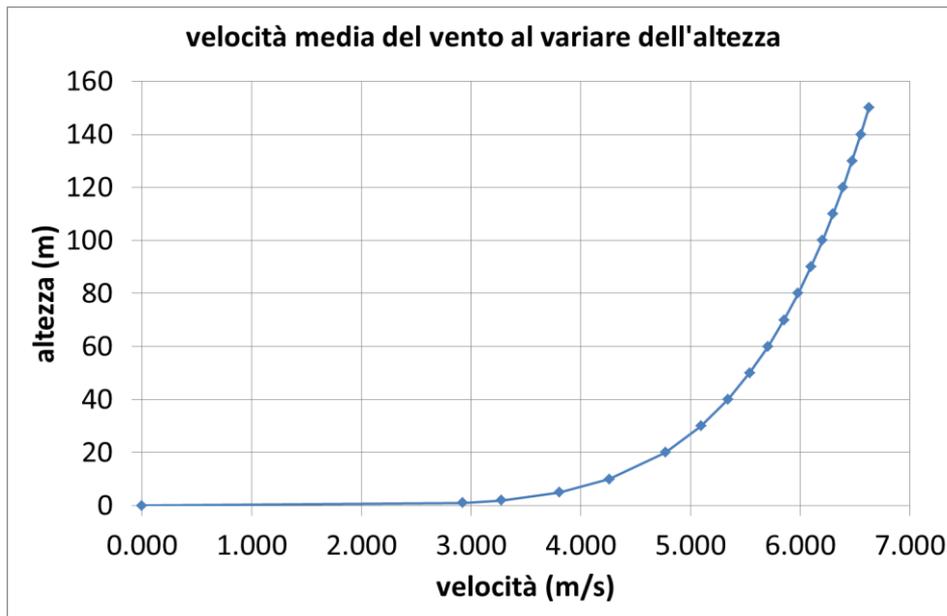
## Esempio di calcolo dell'energia prodotta in un anno - 2

Rilevazione della velocità del vento ad una altezza dal suolo di 10 m (valore medio =  $v_{10}$ ) e 20 m (valore medio =  $v_{20}$ )

$v_{10} = 4,26$  m/s,  $v_{20} = 4.77$  m/s

Profilo di velocità con legge di potenza:

$$v(z) = v(z_1) \left( \frac{z}{z_1} \right)^\alpha$$



$\alpha$  = parametro di rugosità

$\alpha$  è un parametro che dipende dalla rugosità del terreno (presenza di ostacoli, boschi, case, colline ..) (0.1 – 0.3)

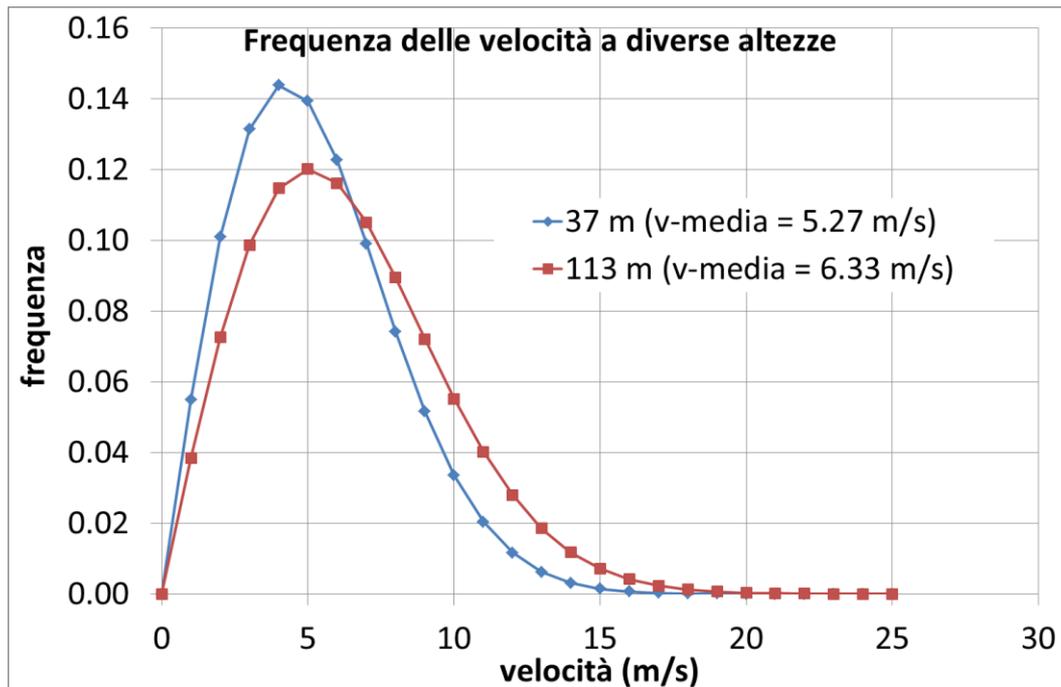
$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{v_{20}}{v_{10}}\right)}{\ln\left(\frac{20}{10}\right)} = 0.16$$

# Esempio di calcolo dell'energia prodotta in un anno - 3

Frequenza delle velocità descrivibile mediante la funzione distribuzione delle probabilità di Weibull a due parametri

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad k = \text{parametro di forma, adimensionale}$$

$c$  = parametro di scala (m/s) che dipende dalla velocità media



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

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} y^{x-1} e^{-y} dy$$

$k = 2$  : distribuzione di Rayleigh

$$c = \frac{2\langle v \rangle}{\pi}$$

## Esempio di calcolo dell'energia prodotta in un anno - 4

<b>Generatore</b>	<b>H (m)</b>	<b><math>\langle v \rangle</math> (m/s)</b>	<b>AEP (MWh/anno)</b>
E-33	37	5.27	796
E-44	45	5.44	1599
E-70	57	5.66	4567
E-70	64	5.77	4759
E-70	85	6.04	5247
E-70	98	6.18	5502
E-70	113	6.33	5762

E33:  $P_n = 330$  kW,  $D = 33.4$  m,  $H = 37/44/49/50$  m

E44:  $P_n = 900$  kW,  $D = 44$  m,  $H = 45/55/65$  m

E70:  $P_n = 2300$  kW,  $D = 71$  m,  $H = 57/84/85/98/113$  m