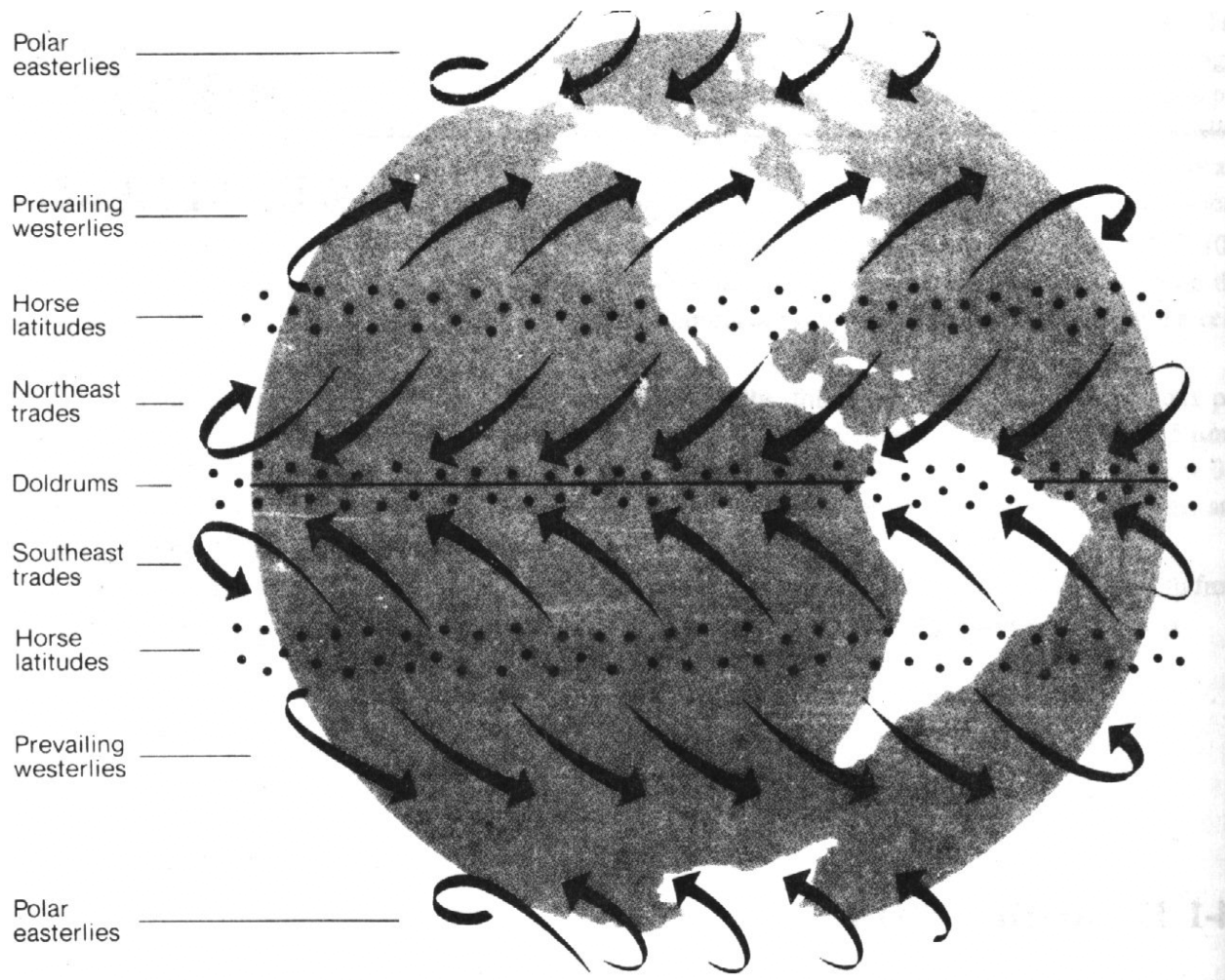


Energia eolica

Energia eolica

- La circolazione delle masse d'aria attorno alle zone di bassa pressione avviene allora in senso antiorario nell'emisfero boreale ed orario nell'emisfero australe
- I venti locali sono causati da due meccanismi distinti:
 - diverso riscaldamento fra terra ed acqua
 - diverso riscaldamento della montagna rispetto alla pianura.

Venti planetari



Sfruttamento energia eolica

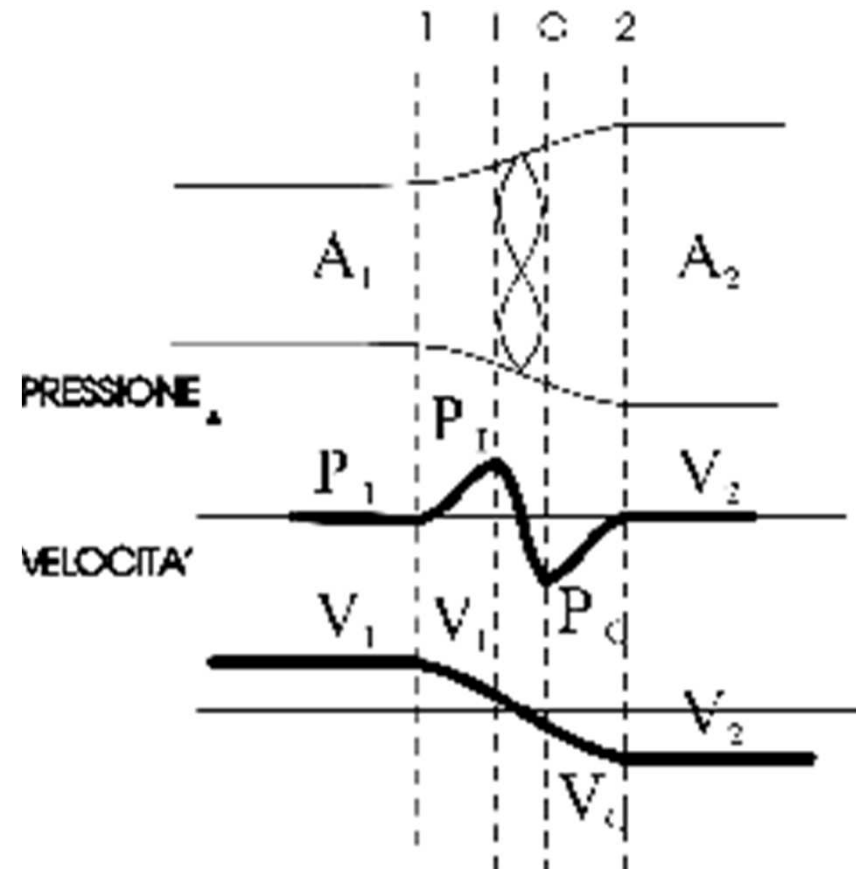
- La potenza posseduta da una corrente indisturbata (portata per l'energia cinetica)

$$P = A\rho_0 V_0 \cdot \frac{1}{2} V_0^2 = \frac{1}{2} \rho_0 A V_0^3$$

- ρ_0 è la densità del fluido (per l'aria a bassa quota si può assumere pari 1.25 kg/m^3);
- A è l'area spazzata dall'elica cioè $D^2/4$;
- V_0 è la velocità della corrente fluida indisturbata.

Teoria monodimensionale di Betz

- Permette di valutare l'effettiva potenza massima teorica ricavabile da un aeromotore ad asse orizzontale posto in una corrente di aria avente velocità indisturbate pari a V_1 (velocità di monte) e V_2 (velocità di valle)
- V velocità del flusso attraverso le pale.



Teoria di Betz: Ipotesi

- Concetto di tubo di flusso;
- Monodimensionalità;
- Flusso indisturbato dalla presenza della macchina sia a monte che a valle;
- Assenza di ostacoli;
- Flusso stazionario e velocità indipendente dalla quota;
- Nessun effetto di rotazione della vena fluida;
- Flusso incomprimibile.

Teoria di Betz

- Con l'ipotesi di flusso incomprimibile e $P_1 = P_2$

$$V_1 \cong V_0 \cong V$$

$$\begin{array}{l} \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_I}{\rho_I} + \frac{V_I^2}{2} \\ \frac{P_0}{\rho_0} + \frac{V_0^2}{2} = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2} \end{array} \quad \begin{array}{l} \nearrow \\ \nearrow \end{array} \quad P_I - P_0 = \rho \frac{V_1^2 - V_2^2}{2}$$

- La forza F_x assiale agente sulla palettatura è

$$F_x = (P_I - P_0)A = \rho A \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} = \rho AV(V_1 - V_2) = q\Delta V$$

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

Teoria di Betz

- Espressione della potenza come prodotto della portata q per il lavoro specifico W_u (bilancio energetico per il sistema termodinamico delimitato dalle sezioni 1 e 2)

$$E_c^{in} = E_c^{out} + W_u$$

- E_c energia cinetica posseduta dalla unità massa fluida

$$W_u = \frac{1}{2}(V_1^2 - V_2^2)$$

Teoria di Betz

- La potenza è data da:

$$P = q \cdot W_u = \rho A V \cdot \frac{1}{2} (V_1^2 - V_2^2) = \frac{\rho A (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4}$$

- Derivando si ottiene il massimo valore teorico della potenza:

$$\frac{\partial P}{\partial V_2} = \frac{\rho A (V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2)}{4} = 0$$

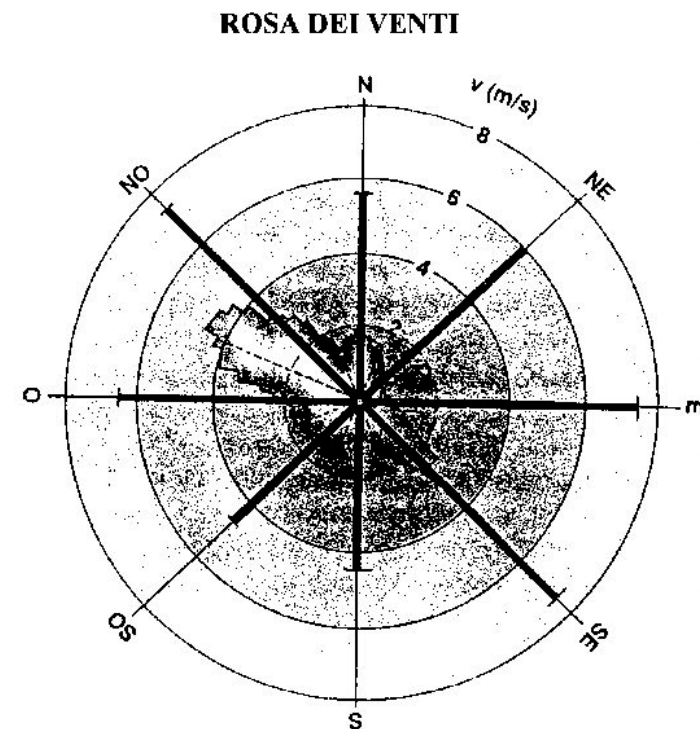
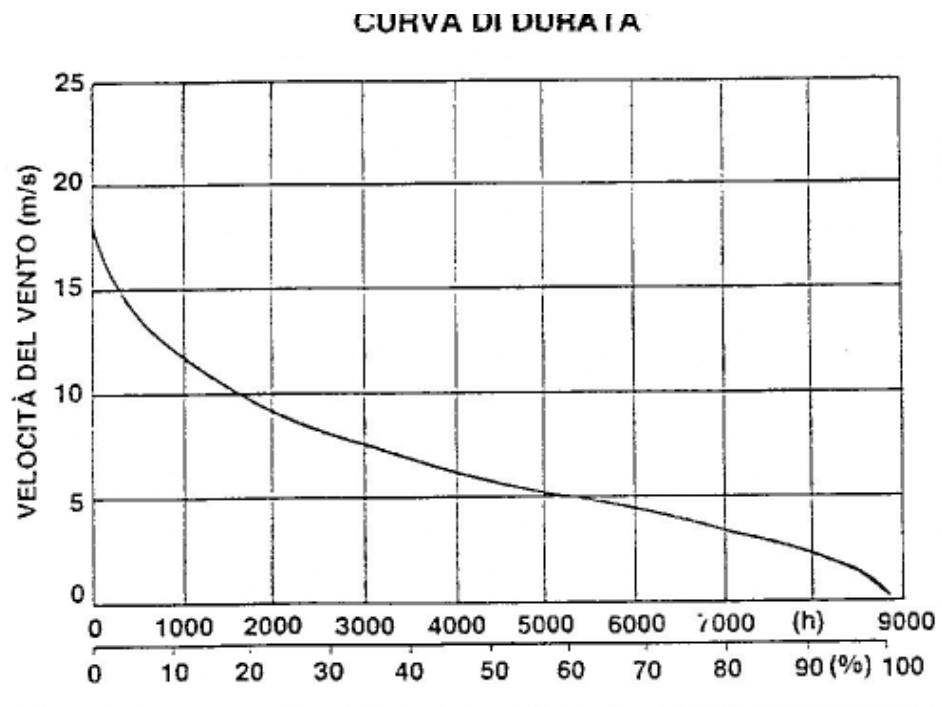
- Da cui:

$$V_2 = \frac{V_1}{3}$$

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho A V_1^3 = \frac{16}{27} P_{\text{teorica}}$$

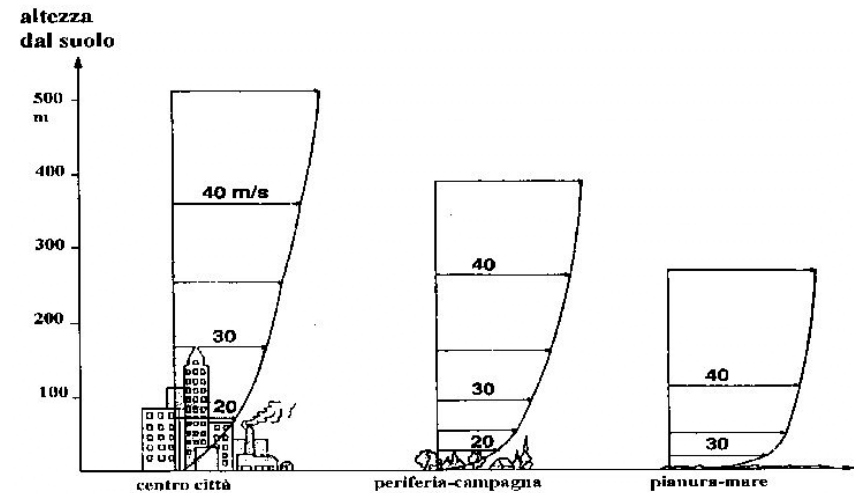
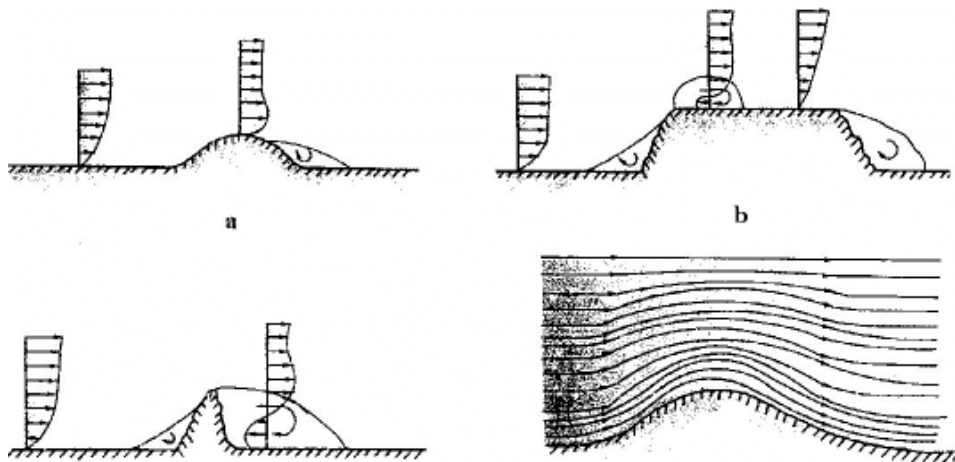
Scelta del sito

- velocità media del vento
- la costanza della direzione dei venti dominanti
- limitata turbolenza dell'aria.



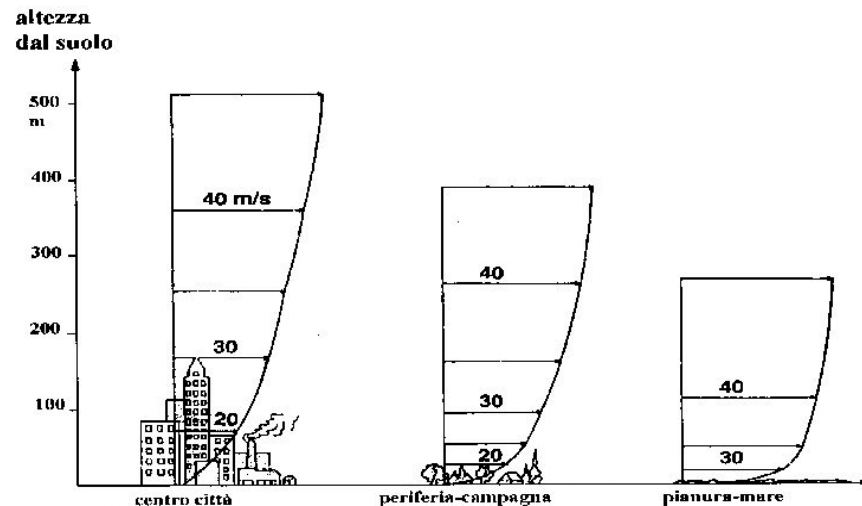
Scelta del sito

- Conformazione del terreno



- Inquinamento acustico (un aerogeneratore da 300 kW funzionante con un vento di 8 m/s produce alla distanza di 200 m un livello di pressione sonora di circa 45 dB)
- impegno del territorio

Scelta del sito



$$\frac{V}{V_R} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)}$$

z_R = Quota di riferimento

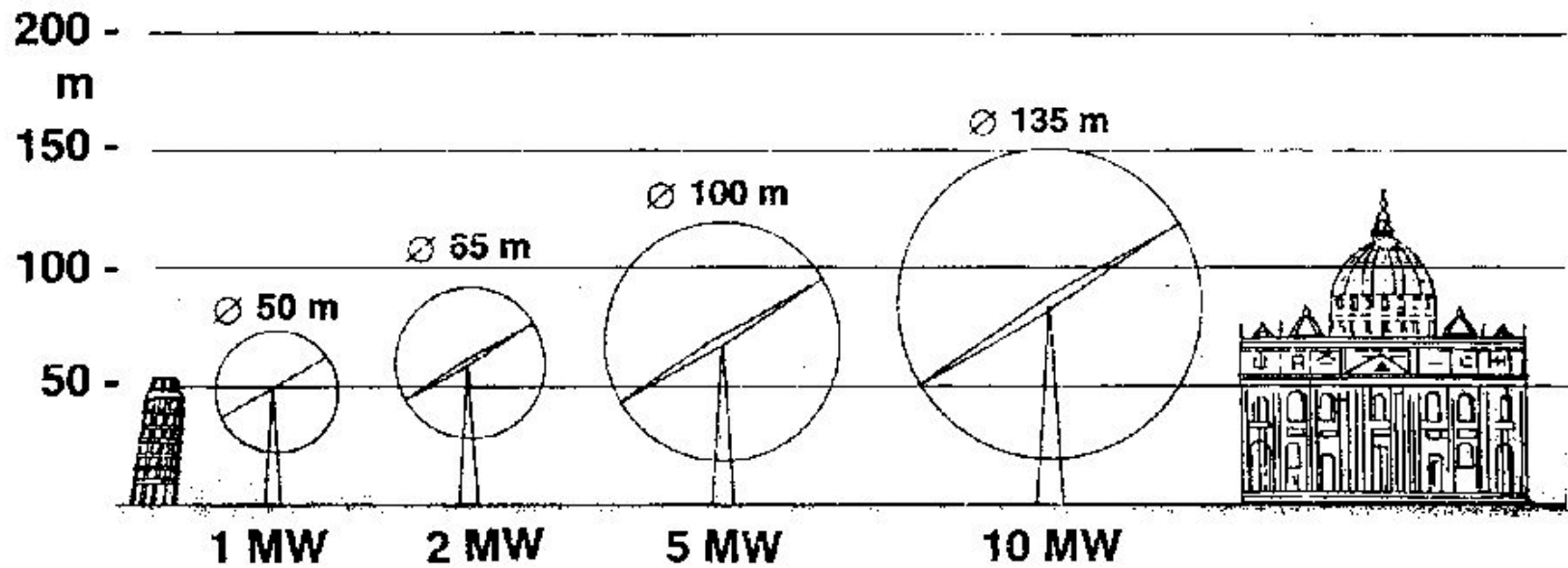
V_R = Velocità alla quota di riferimento

z_0 = Roughness length (dim. Vortici suolo)

Class	Roughness Length m	Landscape Type
0	0.0002	Water surface
0.5	0.0024	Completely open terrain with a smooth surface, e.g. concrete runways in airports, mowed grass, etc.
1	0.03	Open agricultural area without fences and hedgerows and very scattered buildings. Only softly rounded hills
1.5	0.055	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 1250 metres
2	0.1	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 500 metres
2.5	0.2	Agricultural land with many houses, shrubs and plants, or 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approx. 250 metres
3	0.4	Villages, small towns, agricultural land with many or tall sheltering hedgerows, forests and very rough and uneven terrain
3.5	0.8	Larger cities with tall buildings
4	1.6	Very large cities with tall buildings and skyscrapers

Scelta del sito

- Impatto visivo



- Fauna

Scelta del sito

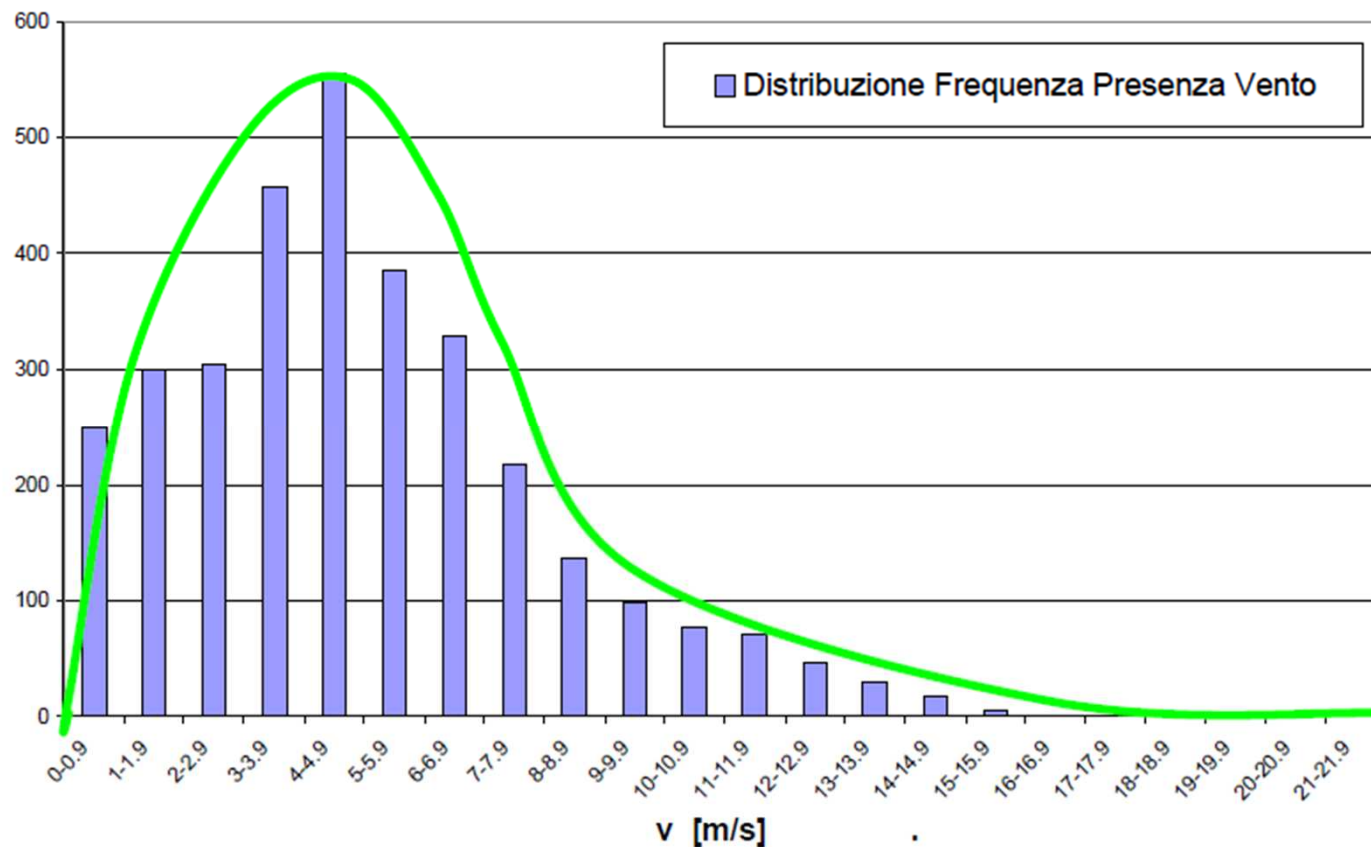
- È necessario avere una conoscenza quanto più precisa possibile della disponibilità del vento in un determinato luogo.
- È necessario determinare la probabilità di occorrenza di una certa intensità di vento in un arco di tempo definito.
- Per questi motivi devono essere effettuate campagne sperimentali della lunghezza di vari mesi o anni (maggiore è il periodo, migliore sarà l'accuratezza dei dati) per ottenere la distribuzione della velocità del vento.
- Si definiscono infine la velocità media e la varianza della distribuzione.
- I dati sono raccolti a quote diverse e a intervalli di circa 10 min.

$$V_m = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N V_i \right]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2}$$

Distribuzione di Weibull

- Dall'analisi dei dati sperimentali si può ricavare la distribuzione probabilistica della velocità del vento



Distribuzione di Weibull

La funzione di densità di probabilità è data da:

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right)$$

c = parametro di scala: da un'idea della velocità media del vento;

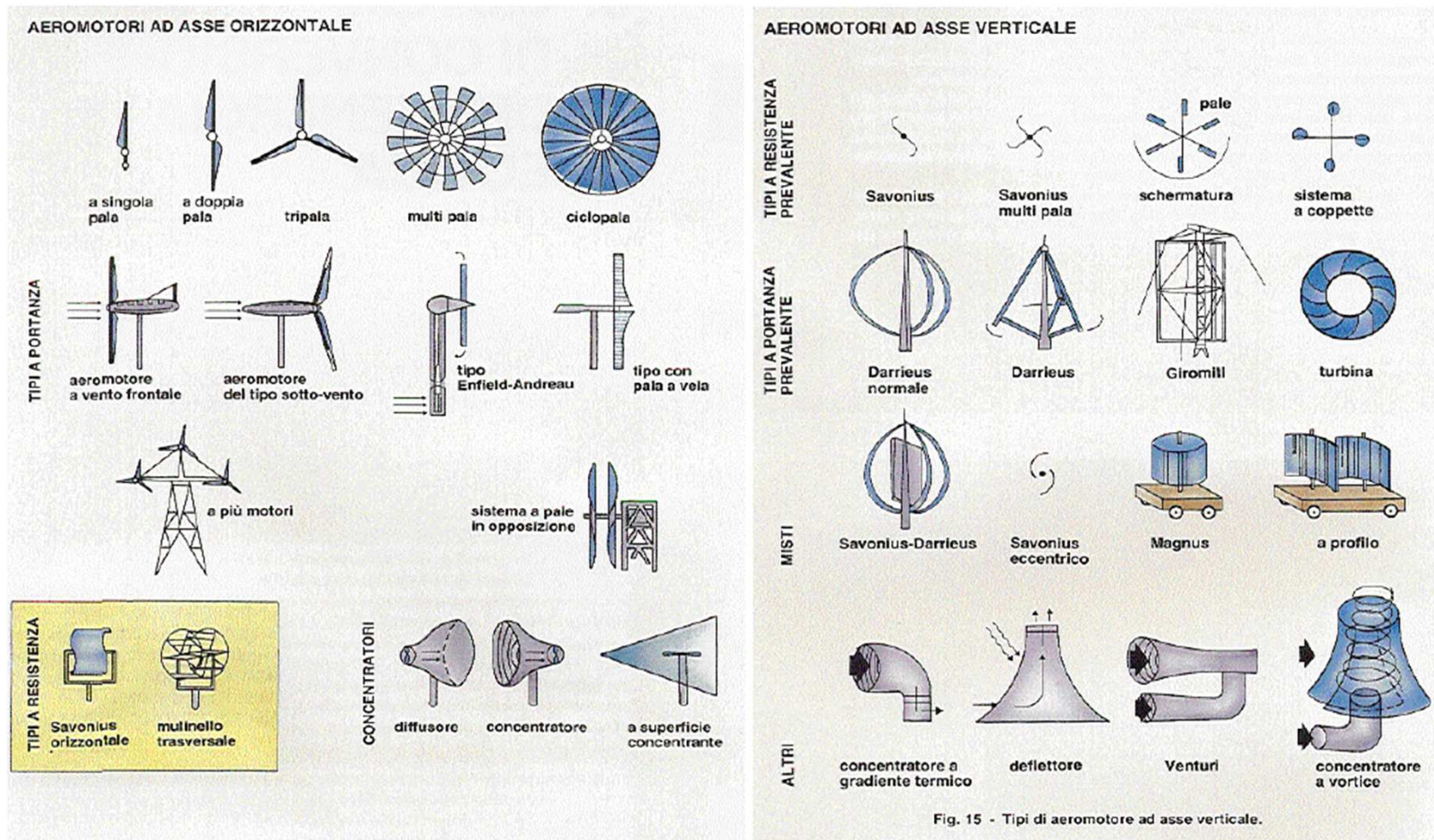
k = fattore di forma: indica quanto le velocità sono concentrate intorno ad un valore.

$$k = \left(\frac{\sigma}{V_M} \right)^{-1,086}$$

$$c \cong \frac{k^{2,6674}}{0,184 + 0,816k^{2,73855}}$$

Tipologia di aerogeneratori

- aeromotori ad asse orizzontale
- aeromotori ad asse verticale



Prestazioni degli aerogeneratori

- Coefficiente di potenza

$$C_P = \frac{P_{\max,effettiva}}{P_{\max,Teorica}}$$

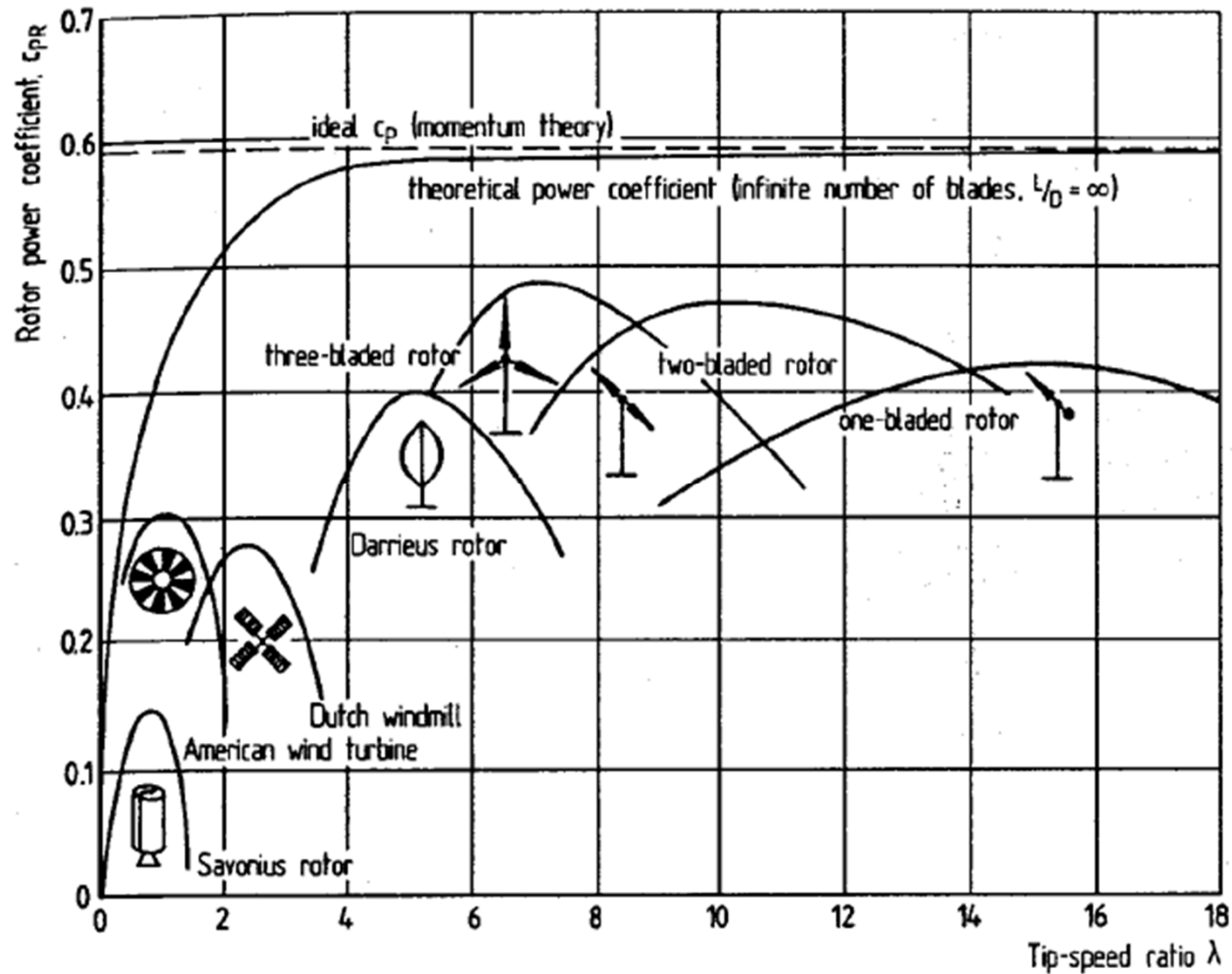
- Coefficiente di velocità periferica

$$C_V = \frac{V_P}{V_0}$$

- La velocità periferica dipende anche dal numero di pale

- $$P = M \cdot \omega = Z \cdot T \cdot \omega = Z \cdot T \cdot \frac{V_P}{R} = Z \cdot T \cdot \frac{C_V \cdot V_0}{R}$$

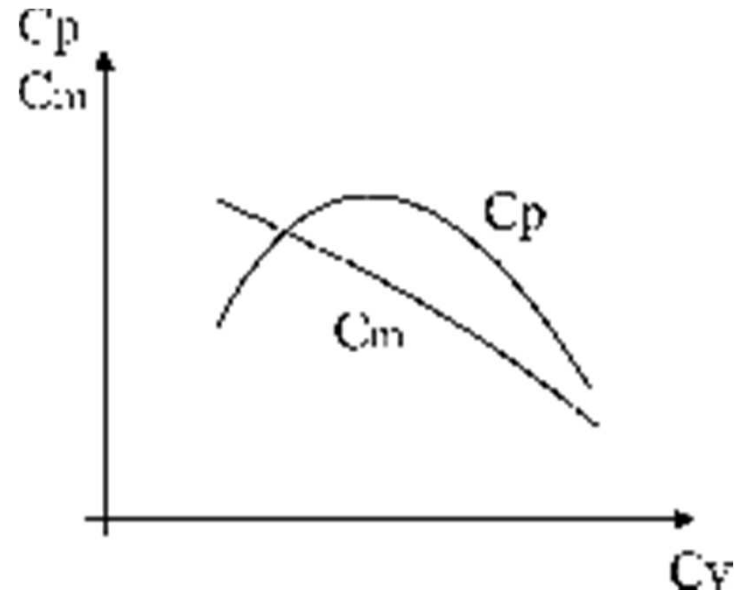
Curve di prestazione



Curve di prestazione

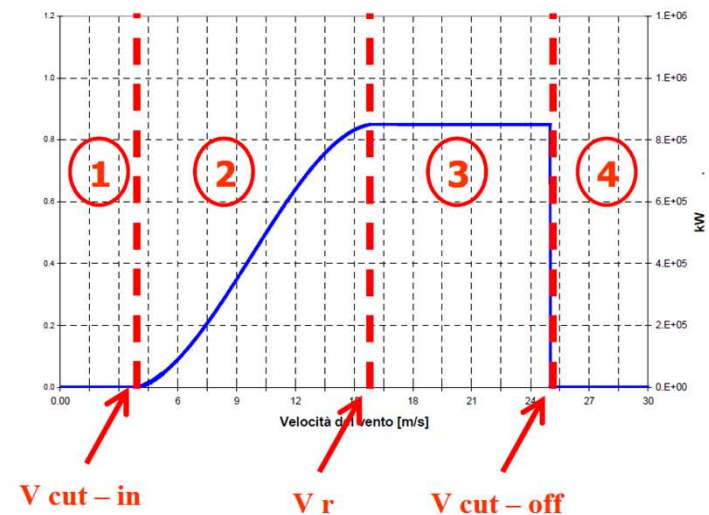
- Coefficiente di momento

$$C_m = \frac{M}{\frac{\rho S V_0^2 R_e}{2}}$$



- Curva caratteristica

$$P(v) = \begin{cases} 0 & 0 < v < v_1 \\ a_1 v^3 + a_2 v^2 + a_3 v + a_4 & v_1 < v < v_r \\ P_r & v_r < v < v_3 \\ 0 & v > v_r \end{cases}$$



Energia prodotta e rendimento

- L'energia prodotta per una determinata macchina e per un determinato sito è

$$E_{TA} = t \int_{v_{cut-in}}^{v_{cut-off}} P(v) \cdot f(v) dv$$

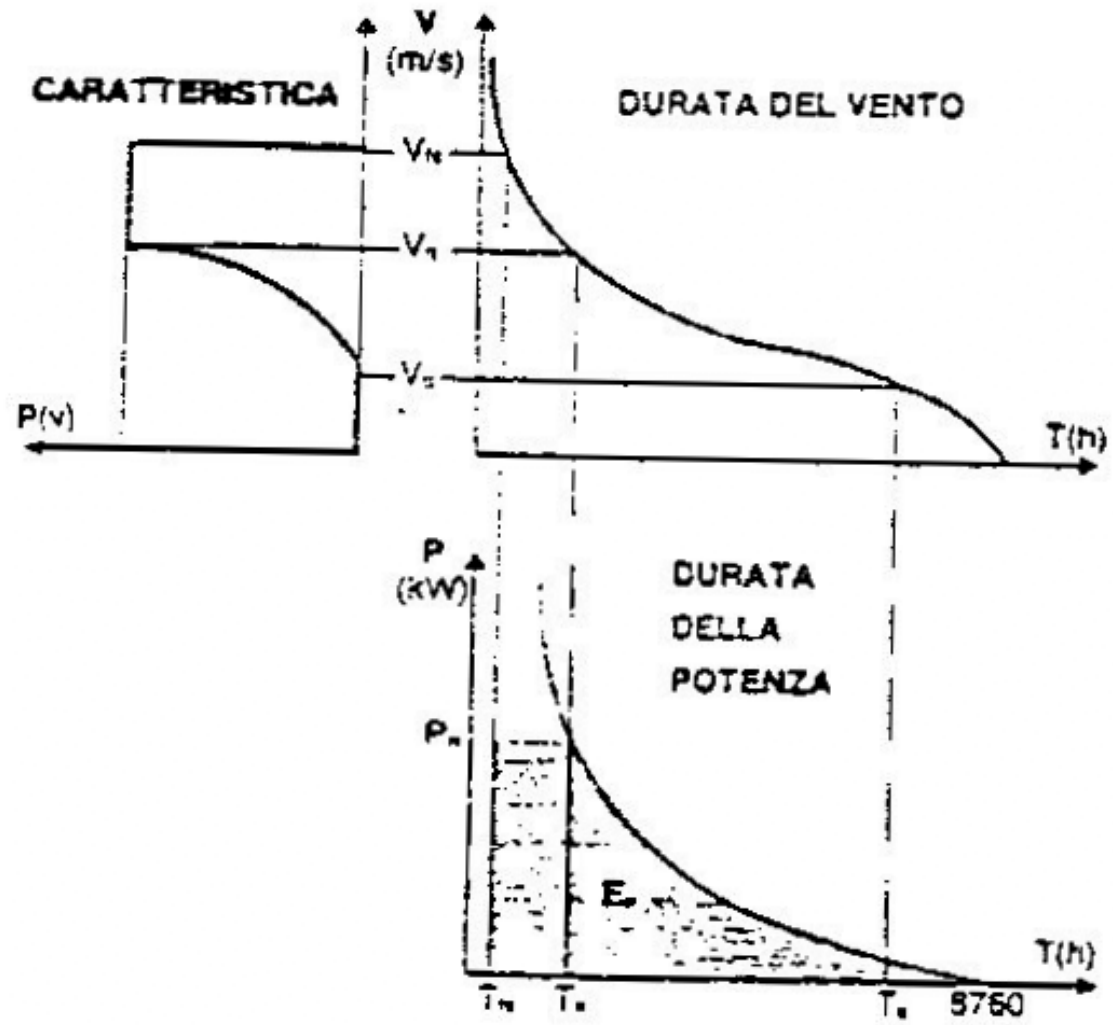
Per una macchina ideale

$$E_{TW} = t \int_0^{\infty} P(v)_i \cdot f(v) dv \quad \text{dove } P(v)_i = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

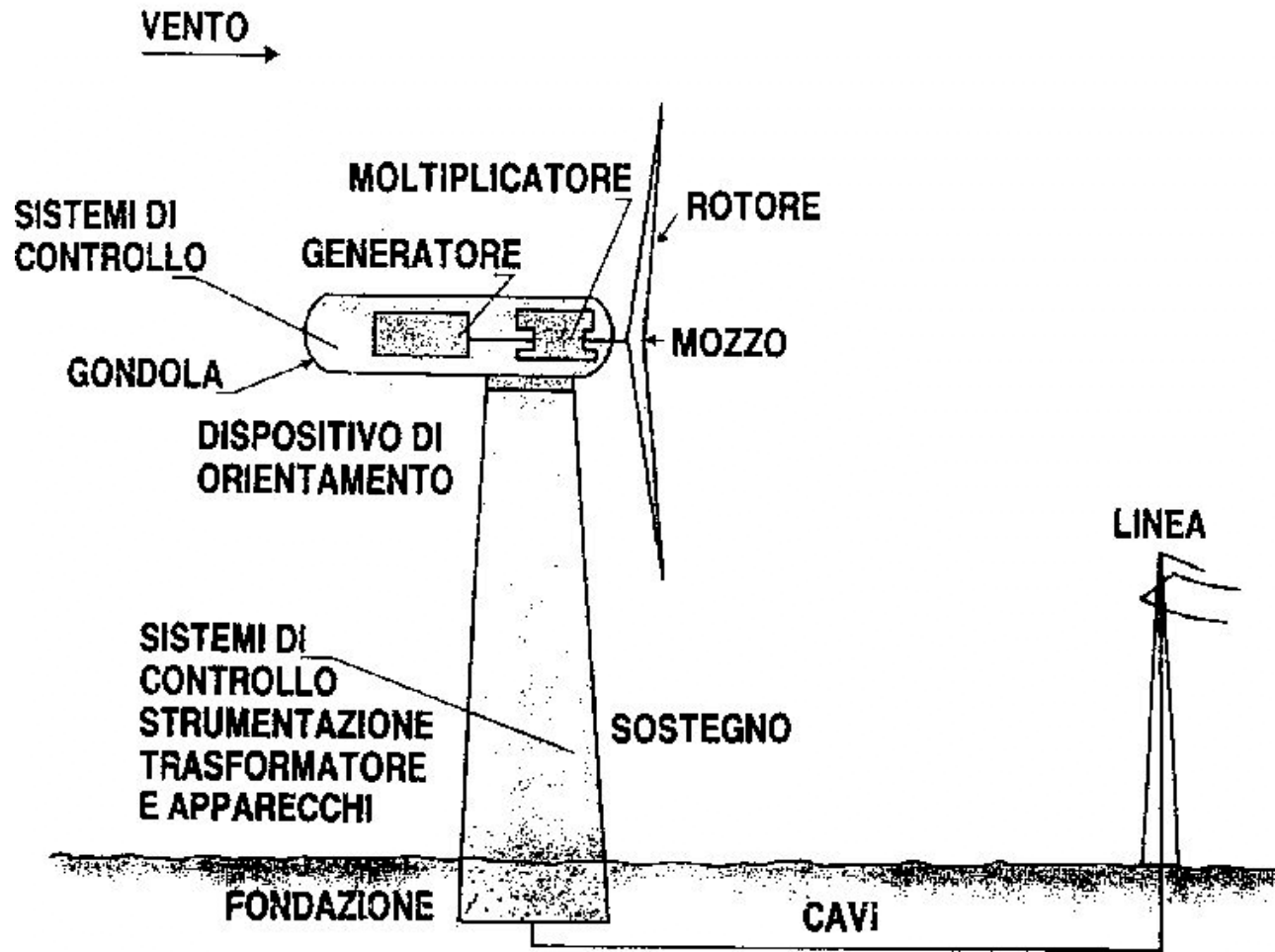
Il rendimento della macchina è

$$\eta = \frac{E_{TA}}{E_{TW}}$$

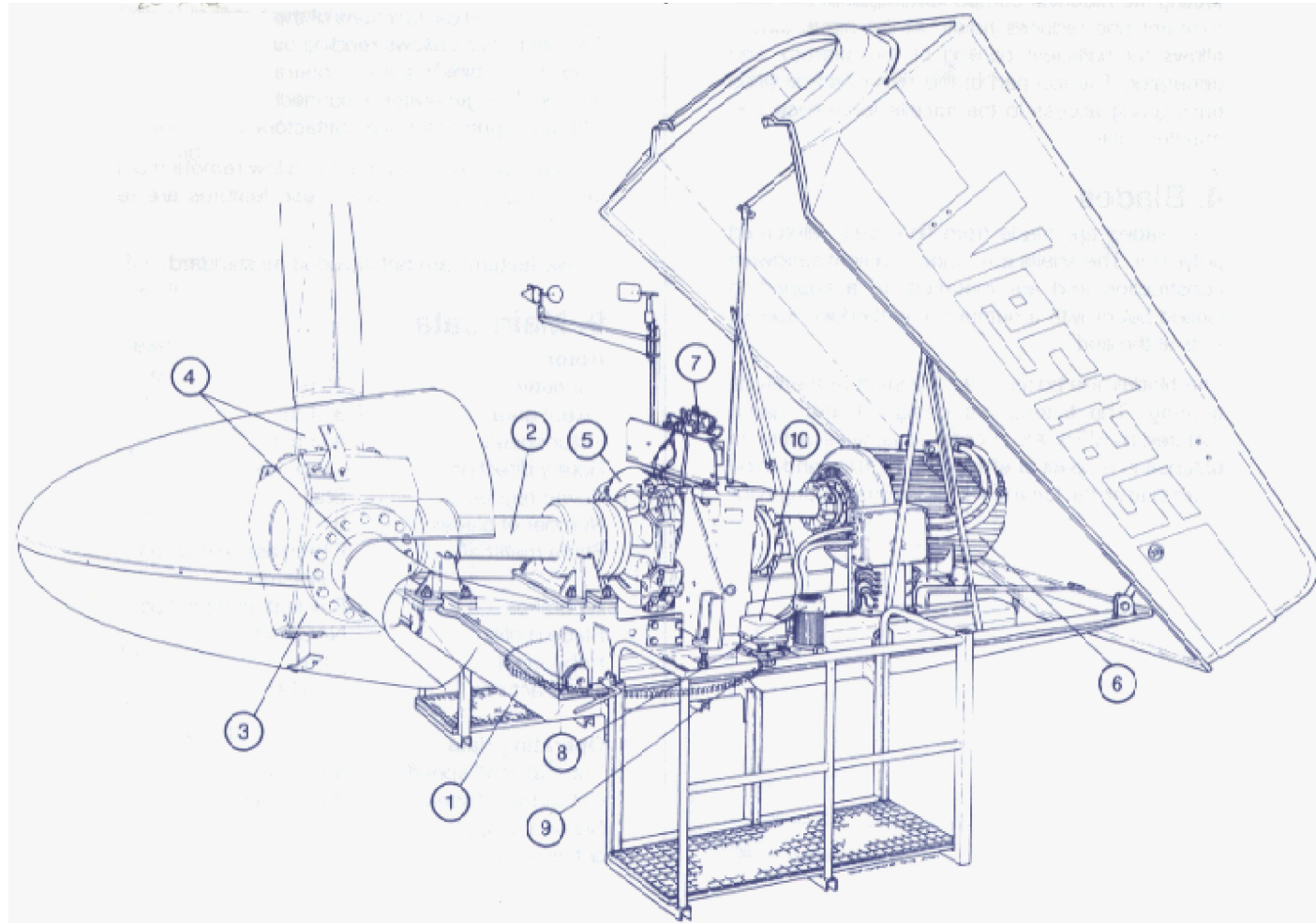
Dimensionamento



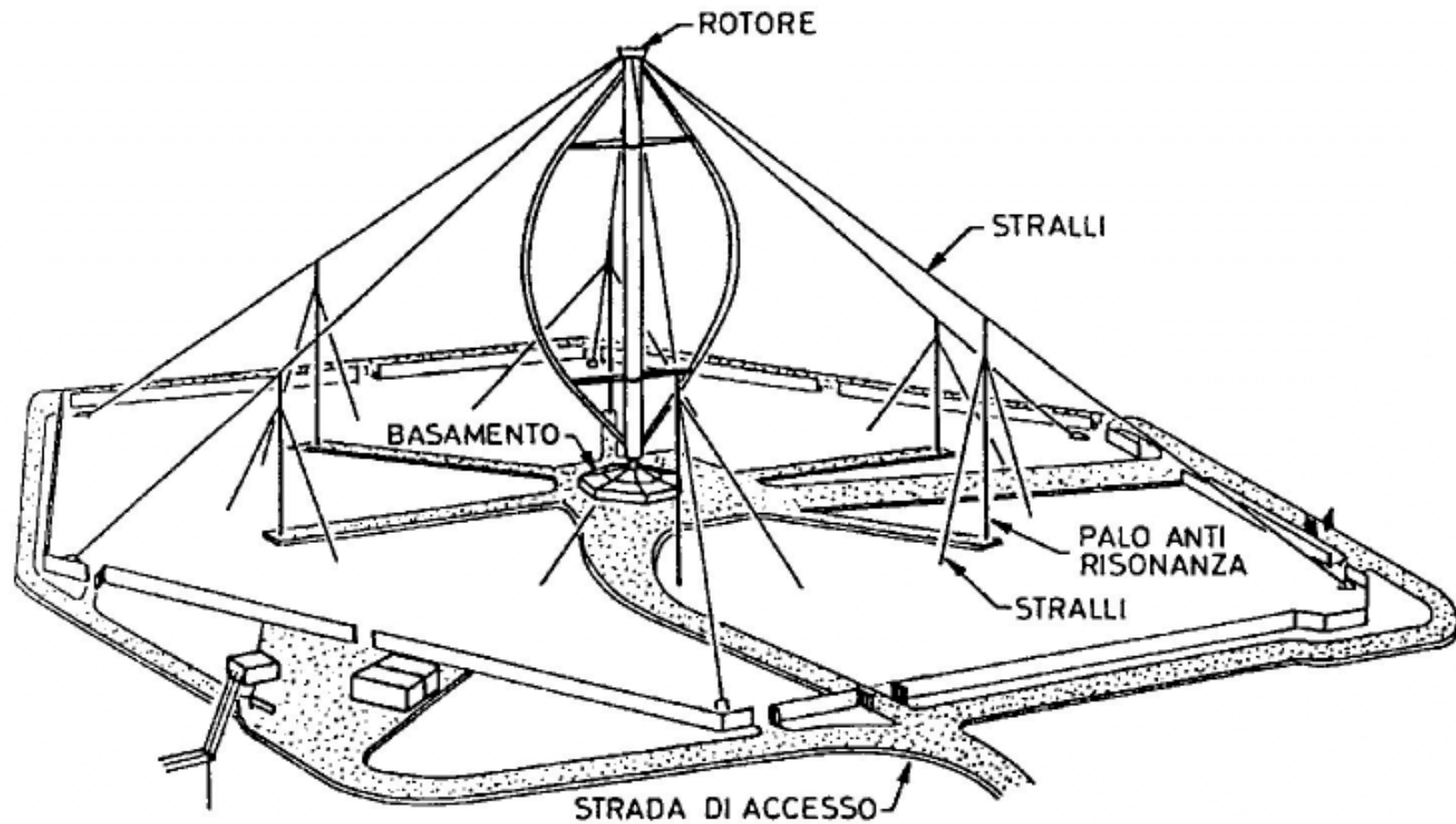
Aerogeneratore ad asse orizzontale



Navicella



Aerogeneratori ad asse verticale



Immagini



Primo aerogeneratore di en. elettrica



Turbina Darreius



Turbina tripala asse orizzontale



Offshore windfarm



Turbine Savonius



Montaggio rotore