

## Parte III

# Turbine Eoliche

Le turbine eoliche sono macchine a flusso incompressibile seppur il fluido utilizzato sia gassoso, è utile infatti ricordarsi che la proprietà di comprimibilità o incompressibilità dipende dal flusso e non dal fluido; infatti le turbine eoliche, dato che per la velocità del vento  $Ma \ll 1$ , possono essere considerate macchine a flusso incompressibile perché non avvengono fenomeni di comprimibilità.

Le turbine eoliche sono usate per la produzione di energia e sono fonti discontinue e non controllabili.

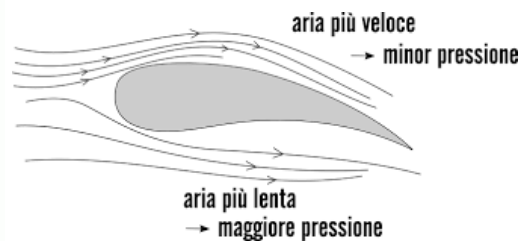
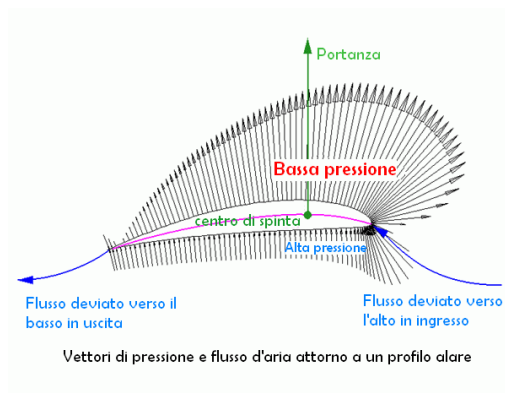
Se lo studio del vento viene effettuato secondo il modello di lastra piana investita dal flusso è possibile considerare la velocità del vento nota sia nello spazio che nel tempo: l'inurbamento è compreso nello strato limite e la turbina lavora nella zona di flusso indisturbato, a velocità costante.



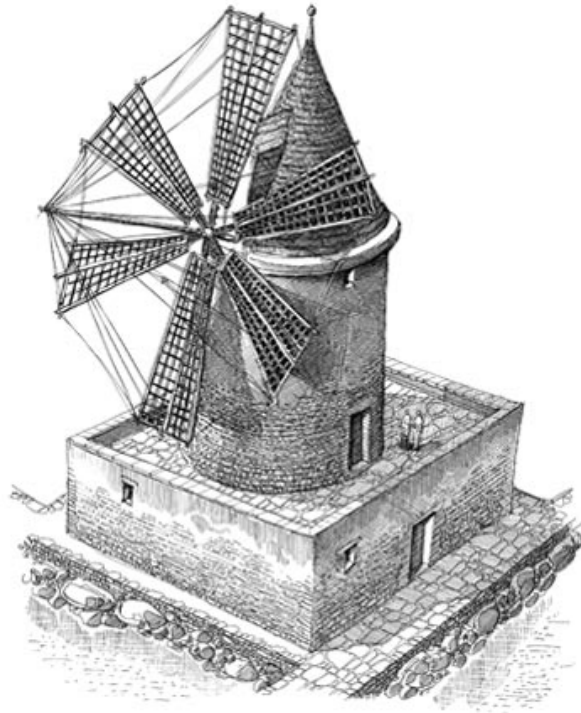
## Tipologie di turbine eoliche

Le turbine eoliche essendo collegate a generatori in DC non presentano la problematica che si era incontrata con le turbine idrauliche ovvero quella di un alternatore che debba girare alla loro stessa frequenza.

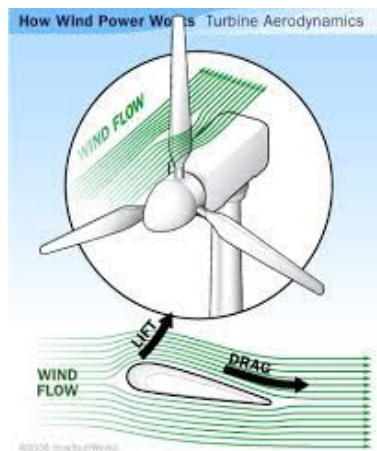
Le pale di una turbina eolica altro non sono che profili alari.







In passato le pale venivano trascinate dalla resistenza aerodinamica, non funzionavano per lift ma per drag (come avere il vento in poppa).



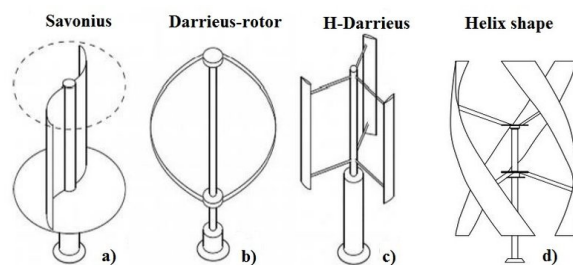
Nel presente, seppur le Drag Wind Turbines rimangano una moderna applicazione di nicchia, le turbine eoliche maggiormente utilizzate sfruttano la portanza, il lift.



Le turbine eoliche possono essere ad asse verticale o ad asse orizzontale

	HAWT	VAWT
Lift Type		
Drag Type		

## Turbine ad asse verticale

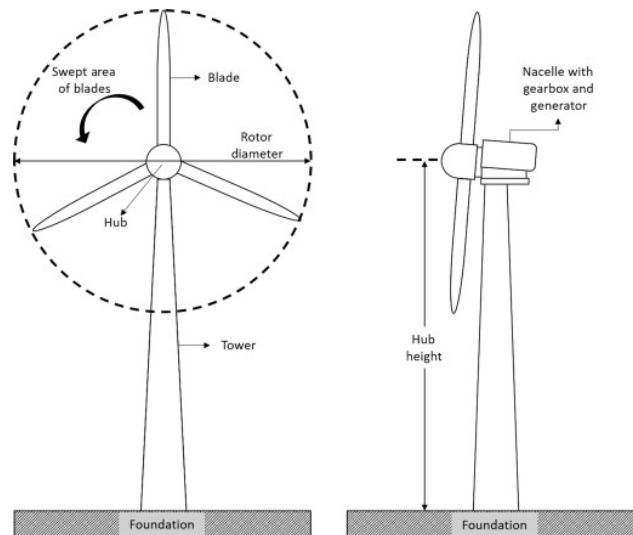


Sono turbine di dimensioni ridotte adatte allo sviluppo fino ai 10 kW.  
Non necessitano di essere orientate in funzione della direzione del vento e presentano palettature che possono estendersi fino al suolo, adatte principalmente a basse velocità del vento.

Sono turbine che necessitano di essere avviate e hanno bisogno di una particolare sensoristica che legga la velocità del vento in modo da farle attivare nel loro range di funzionamento.

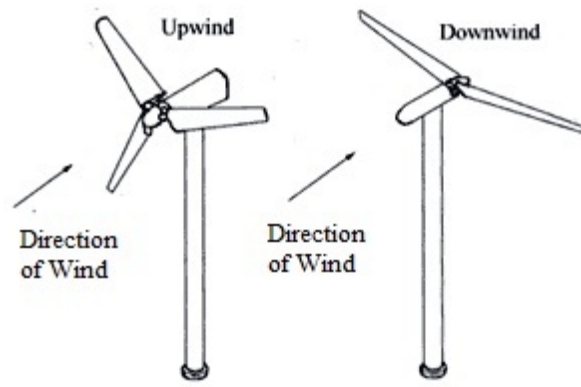
Sono macchine che di contro hanno un'elevata fluttuazione della coppia ed una tensione prodotta non costante: le forze si compongono in modo diverso in funzione della posizione delle pale.

## Turbine ad asse orizzontale



Sono turbine più efficienti ed offrono più superficie al vento e necessitano i meccanismi di rotazione.

Si possono trovare in formato Upwind (sopravento) o Downwind (sottovento) in funzione di come sono state installate.



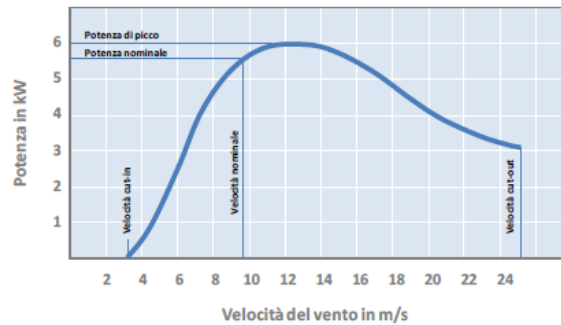
Come intuibile lavorano per elevate portate di fluido e sono caratterizzate da basso lavoro specifico.

In questi tipi di turbine non è previsto uno statore per evidenti motivi costruttivi, ma le sue funzioni vengono tuttavia svolte dal controllo della rotazione della navicella e dall'angolo di attacco delle pale.

# Dimensionamento del parco eolico

Poiché l'installazione di un parco eolico è estremamente costosa 3000\$ per kW installato, sono necessari attenti e minuziosi studi di fattibilità.

Si parte in prima battuta dall'analisi della curva caratteristica della turbina che si vuole installare:



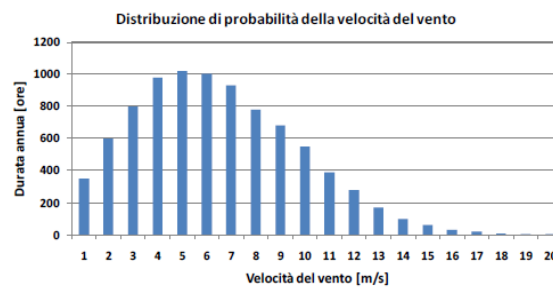
Si identifica una velocità di out-in o di ingresso per la quale la pala non viene messa in moto, è economicamente sconsigliato, ci sarebbero più perdite che guadagni. Il rotore gira, ma non è in grado di generare corrente.

Si identifica una velocità di out-out o cut-off per la quale la pala viene bloccata, le velocità eccessive a cui verrebbe sottoposta rischierebbero il suo danneggiamento.

Si identifica poi la potenza nominale come il valore corrispondente alla velocità nominale ( $10 \div 15 \text{ m/s}$ ), condizione prossima a quella in cui la turbina inizia ad andare in sicurezza e a limitare l'output. La generazione della potenza nominale è ciò che ci si deve aspettare dal corretto dimensionamento di una turbina eolica.

La potenza di picco rappresenta invece la massima potenza che la turbina può generare. Un valore elevato della potenza di picco non costituisce necessariamente un fattore di pregio, in quanto si verifica raramente in presenza di venti forti.

Identificata la tipologia di turbina che andrà a comporre il parco eolico, sarà ora necessario analizzare in prima approssimazione dei database di venti e e poi dei grafici di densità di probabilità (PDF) per determinare per quanto tempo permane quella specifica velocità del vento.



In ascissa sono riportati i valori di velocità del vento mediati su una durata di 10 minuti.

Per ogni valore di velocità la curva riporta il tempo di permanenza complessiva misurato nel corso dell'anno, in percentuale oppure in ore.

Ai fini del calcolo della resa energetica annua, la curva di distribuzione va confrontata con la curva di potenza della turbina.

La producibilità annua può essere espressa attraverso la seguente formulazione:

$$E = 8760 \cdot \eta \cdot \int_0^{u_{\max}} P(u) \cdot \text{PDF}(u) \cdot du$$

In cui:

- $\eta$  è il rendimento dell'impianto
- $P(u)$  è la potenza in kW prodotto dalla turbina alla velocità del vento dedotta dalla curva di potenza fornita dal costruttore
- $PDF(u)$  è la funzione di distribuzione di probabilità (Probability Dense Function) di frequenza delle velocità del vento nel sito d'installazione.
- 8760 è un semplice fattore di conversione, è il numero delle ore in un anno.

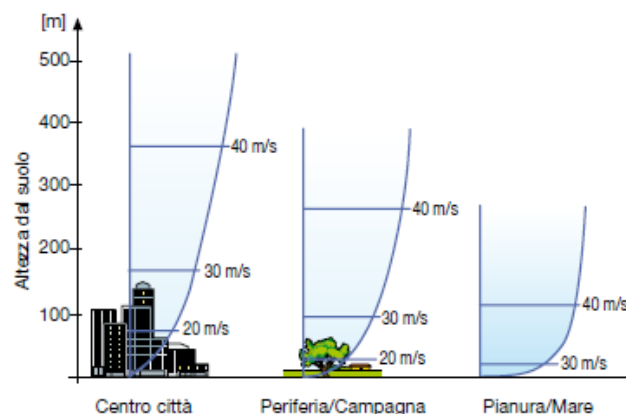
Sarà quindi necessario valutare in modo puntuale se la maggiore resa in condizioni di vento forte compensa la perdita di resa con venti più deboli rispetto ad una turbina di potenza nominale meno elevata e, probabilmente, meno costosa.

Se la stima preliminare è fruttuosa si procederà con misurazioni in situ per almeno 12/18 mesi.

## Posizionamento dell'aerogeneratore

Stabilita la zona di installazione, per un corretto posizionamento dell'aerogeneratore bisogna considerare la presenza di eventuali ostruzioni geologiche e non, quali alberi o edifici, che possano generare turbolenze e determinare una perdita di produttività dell'impianto.

Come già anticipato, si vuole che l'impianto lavori in regime di velocità costante e di flusso indisturbato, quindi all'esterno dello stato limite.

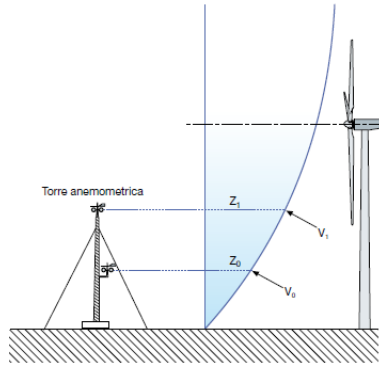


Per determinare il profilo di velocità del vento in funzione della quota si può utilizzare questa relazione

$$c = c_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha$$

Che consente di ricavare la velocità del vento  $c$  alla quota  $h$  di installazione della navicella, note che siano la velocità  $c_0$  alla quota  $h_0$ , magari da rilievi anemometrici, e la rugosità del terreno  $\alpha$ :

$\alpha = 0.9$	mare calmo
$\alpha = 0.12$	aree agricole aperte
$\alpha = 0.30$	zone urbane, boschi



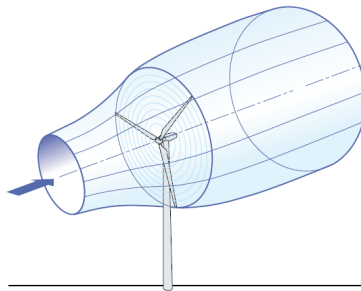
Per quanto possibile, è buona norma cercare di prevedere la costruzione di nuovi edifici oppure la crescita di alberi esistenti, visto che la durata in servizio del sistema può raggiungere i 20 anni.

Come regola generale, la turbina va posizionata sopravvento ad edifici e alberi e dovrebbe essere almeno 10m più elevata di qualunque altra cosa nel raggio di 100m. La presenza di un edificio determina infatti una forte turbolenza nella zona sottovento, che si estende su una lunghezza che può arrivare fino a 20 volte l'altezza dell'edificio stesso.

## Potenza estratta

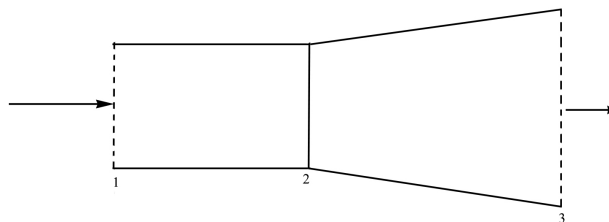
Data una pala di un certo diametro, quanta energia è possibile estrarre?

Per rispondere a questa domanda si passa attraverso lo studio di un modello semplificato di tubo di flusso, si considera cioè il rotore come un disco piano infinitesimo di area  $A$  investito da un flusso in direzione  $x$  ad una certa velocità  $c_{x1}$ .



Alla sezione di ingresso 1 si pone il fluido essere insubordinato, non risente della presenza della pala, all'uscita il flusso potrà porsi sempre indisturbato, è stato cambiato dalla presenza delle pale ma è molto distante e non risente più della loro influenza.

Poiché la pala estrae energia, ci si aspetta  $c_{x3} < c_{x1}$  mentre  $P_1 = P_3 = P_{\text{atm}}$ , inoltre  $A_1 = A_2 \neq A_3$



La portata che investe le pale è:

$$\dot{m} = \rho c_{x2} A_2$$

Effettuando il bilancio della quantità di moto tra le sezioni 1 e 3 si scopre come effettivamente agisca una forza:

$$F_x = \dot{m}c_{x1} - \dot{m}c_{x3} = \dot{m}(c_{x1} - c_{x3})$$

La potenza diviene così pari a

$$P = F_x c_{x2} = \dot{m}c_{x2}(c_{x1} - c_{x3})$$

Sostituendo la formulazione della portata si ottiene

$$P = \rho A_2 c_{x2}^2 (c_{x1} - c_{x3}) \quad (15)$$

Si ottiene in questo modo la potenza scambiata dalla pala grazie alla corrente fluida, il problema però è che rimane incognito il termine  $c_{x3}$ .

Ci si accorge allora che la potenza può essere calcolabile anche come quantità di energia sottratta alla corrente fluida, infatti

$$\begin{cases} P_{W1} = \dot{m} \frac{c_{x1}^2}{2} \\ P_{W3} = \dot{m} \frac{c_{x3}^2}{2} \end{cases} \Rightarrow \Delta P_W = \dot{m} \left( \frac{c_{x1}^2}{2} - \frac{c_{x3}^2}{2} \right)$$

Si ritrova l'energia cinetica del vento come energia estratta dalle pale; il problema anche qui è che  $c_{x3}$  continua ad essere incognito.

Si sfrutta allora il fatto che le due potenze ricavate devono essere uguali, ovvero l'energia sottratta al vento  $P_W$  deve essere pari a quella scambiata dalle pale  $P$ , allora

$$\begin{aligned} P_W &= P \\ \cancel{\dot{m}} \frac{(c_{x1}^2 - c_{x3}^2)}{2} &= \cancel{\dot{m}} c_{x2} (c_{x1} - c_{x3}) \\ (\cancel{c_{x1} - c_{x3}})(c_{x1} + c_{x3}) &= 2c_{x2}(\cancel{c_{x1} - c_{x3}}) \\ c_{x2} &= \frac{1}{2}(c_{x1} + c_{x3}) \end{aligned}$$

Si trova come primo risultato che la velocità del flusso che investe la pala è la media tra le velocità di ingresso e di uscita, essendo la potenza funzione di questa velocità, risulta proprio da questa limitata.

Come secondo risultato, ci si può ricavare  $c_{x3}$  finora rimasto incognito, infatti:

$$c_{x3} = 2c_{x2} - c_{x1}$$

Che sostituita in (15) porta a

$$P = \rho A_2 c_{x2}^2 (c_{x1} - 2c_{x2} + c_{x1}) = 2\rho A_2 c_{x2}^2 (c_{x1} + c_{x2})$$

Si definisce  $a$  Fluid Reduction Coefficient o fattore d'interferenza

$$a = \frac{c_{x1} - c_{x2}}{c_{x1}}$$

Come la percentuale di riduzione di quantità di moto tra ingresso ed uscita, allora

$$c_{x2} = c_{x1}(1 - a)$$

E quindi

$$P = 2\rho A_2 c_{x1}^2 (1 - a)^2 c_{x1} a$$

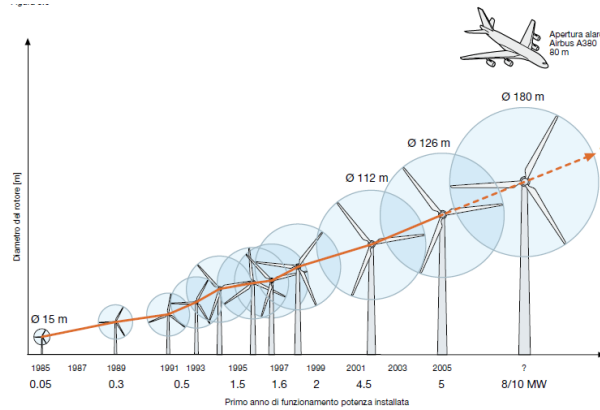
Infine

$$\boxed{P = 2\rho A_2 c_{x1}^3 a (1 - a)^2} \quad (16)$$

La potenza dipende perciò principalmente dall'area delle pale e dal cubo della velocità del vento, se nel primo caso si può sopperire con un effettivo



aumento delle dimensioni delle pale, per il secondo e più importante fattore, è necessario scegliere con cura la zona di installazione dell'impianto.



## Studio della potenza, Legge di Betz

È possibile effettuare uno studio della potenza, e specialmente del termine  $a(1-a)^2$  attraverso il coefficiente di potenza  $C_P$ , questo esprime quanto effettivamente si sta estraendo dalla turbina ed è definito come

$$C_P = \frac{\text{Potenza Ottenuta}}{\text{Potenza Disponibile}} = \frac{P}{\frac{1}{2}c_{x1}^2 \rho A_1 c_{x1}} = \frac{2\rho A_2 c_{x1}^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho A_2 c_{x1}^3} = 4a(1-a)^2$$

Il massimo del coefficiente di potenza, ovvero il massimo del lavoro estratto, si trova imponendo:

$$\frac{d}{da} C_P = 4(3a^2 - 4a + 1) = 0 \Leftrightarrow 3a^2 - 4a + 1 = 0$$

Che porta all'individuazione di due radici reali distinte

$$a_1 = 1 \quad a_2 = \frac{1}{3}$$

Che sostituite all'interno del coefficiente di pressione portano a

$$C_P(1) = 0 \quad C_P\left(\frac{1}{3}\right) \approx 0.593$$

Ciò significa che il massimo lavoro estraibile da una turbina eolica raggiunge a mala pena il 60% dell'energia totale del vento. Tale risultato va sotto il nome di legge di Betz.