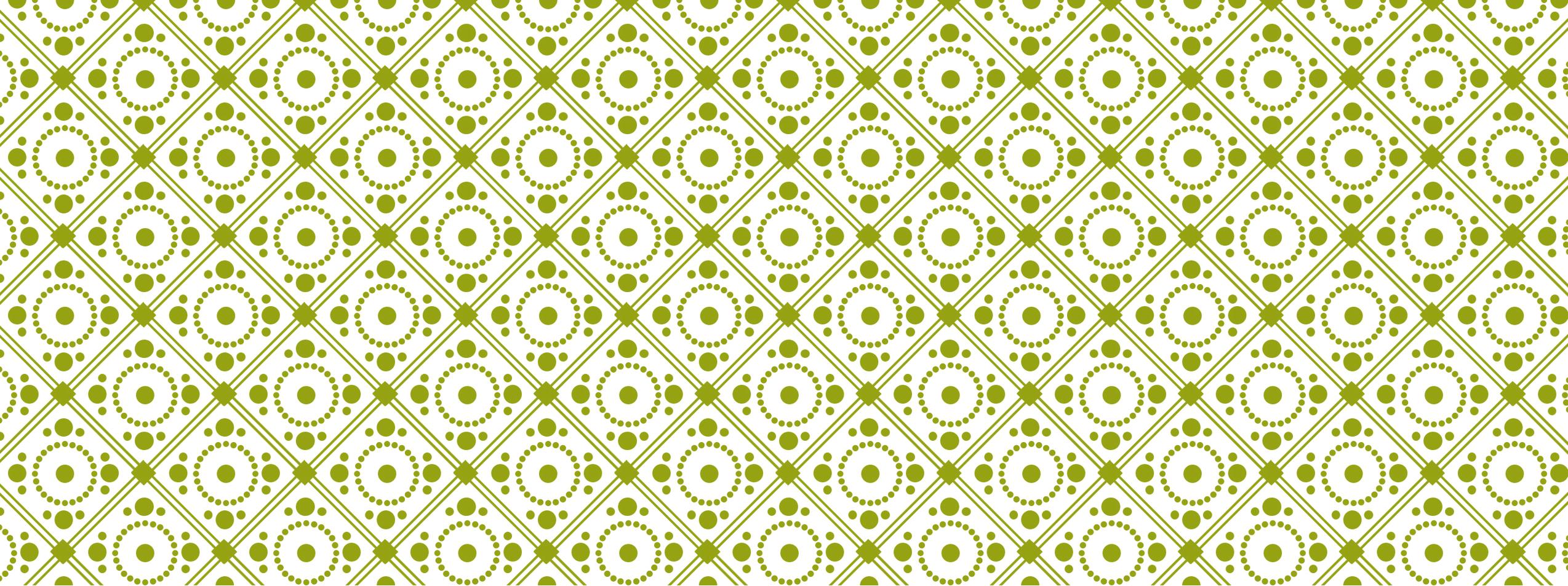


# PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTI RINNOVABILI





# IL VENTO



# ENERGIA EOLICA



Comunemente con il nome di **vento** si indica il movimento di masse d'aria generato da differenze di pressione → energia eolica

È stata la prima forma di energia rinnovabile, assieme a quella idraulica, scoperta dall'uomo ed utilizzata sotto forma di energia meccanica (ad esempio nella navigazione a vela)



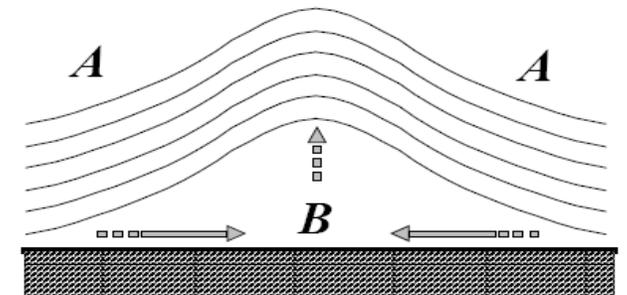
# MOTO DELL'ARIA



- ❖ Se una porzione di superficie terrestre è riscaldata uniformemente, le masse d'aria sovrastanti si trovano a temperatura e pressione costante → le isobare risultano parallele al suolo e non si avrà formazione di vento
- ❖ Se è presente un riscaldamento in una parte della superficie, che genera una differenza di temperatura con la zona periferica, nella zona più calda l'aria, riscaldandosi, diminuirà di densità, tendendo a portarsi verso l'alto e le particelle d'aria tendono a scivolare ai lati verso le zone fredde

Nelle zone fredde si avrà quindi accumulo d'aria ed aumento di pressione, mentre nella zona calda la pressione tenderà a diminuire. Si creano quindi squilibri tra le pressioni.

Per compensare le differenze, a livello del suolo, alcune masse d'aria si dirigono dalla zona fredda ad alta pressione verso quella calda a bassa pressione, generando moti convettivi: i **venti**. La loro intensità dipende perciò dalle differenze di temperatura e pressione esistenti



# VENTO: DA COSA È INFLUENZATO

Oltre che dai fattori climatici, i movimenti dell'aria vengono determinati dalle caratteristiche della superficie terrestre:

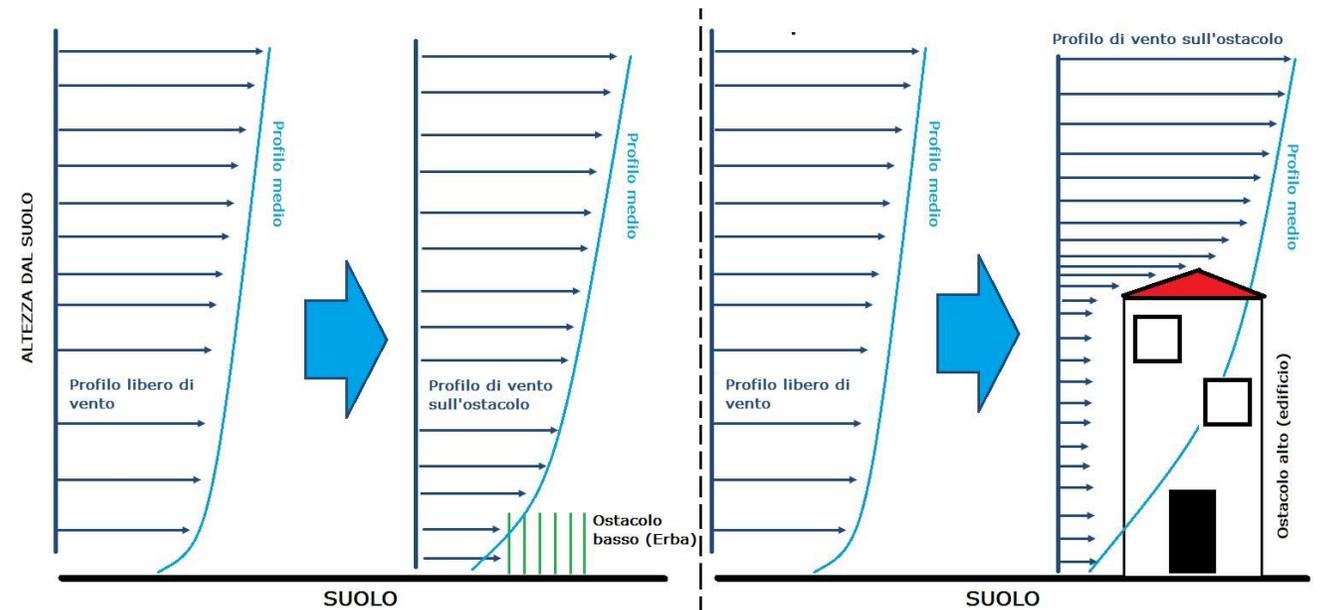
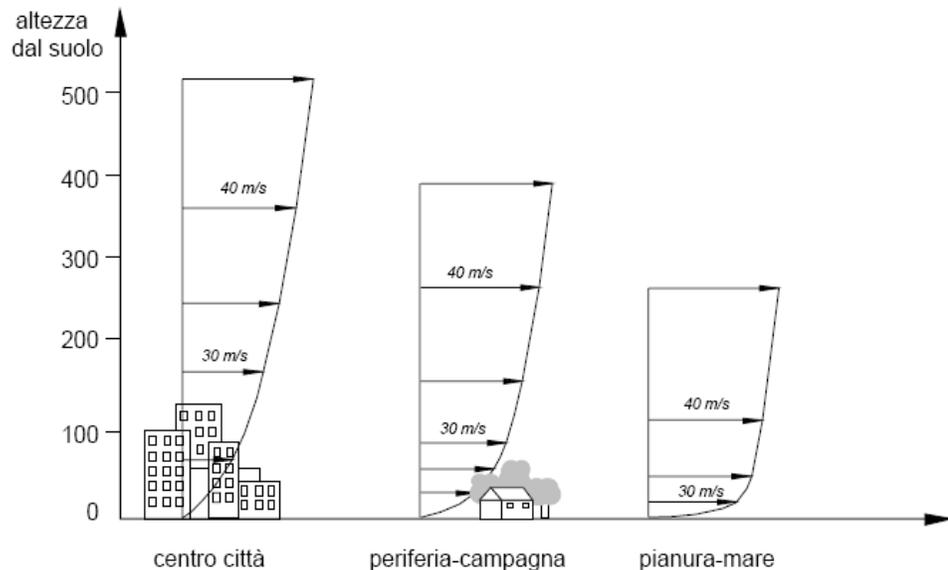
- ❖ a) disomogeneità (aree con differente capacità di assorbimento e rilascio di calore, quali terre, mari, deserti, ghiacciai, ecc.)
- ❖ b) orografia e rugosità, in particolare nei primi 100 m

Valori del coefficiente di rugosità del terreno per vari tipi di superfici.

<b>Tipo di superficie</b>		<b><math>\alpha</math></b>
Liscia	<i>Ghiaccio</i>	0.09
	<i>Fango</i>	0.10
	<i>Neve</i>	0.10
	<i>Mare</i>	0.11
Scarsamente rugosa	<i>Prato</i>	0.10
	<i>Coltivazioni</i>	0.18
Rugosa	<i>Boschi</i>	0.24
Molto rugosa	<i>Città</i>	0.30

# VENTO: DA COSA È INFLUENZATO

La corrente d'aria, nel vincere l'attrito che incontra per la rugosità della superficie, dissipa energia, per cui si instaurano gradienti di velocità.



# VENTO: DA COSA È INFLUENZATO

La velocità del vento risulta variabile con la quota:

$$\frac{h}{H} = \left( \frac{v}{V} \right)^\alpha$$

in cui:

- $h$  è la quota generica
- $H$  è la quota della velocità indisturbata
- $v$  è la velocità del vento alla quota  $h$
- $V$  è la velocità del vento alla quota  $H$
- $\alpha$  è il coefficiente di rugosità del terreno

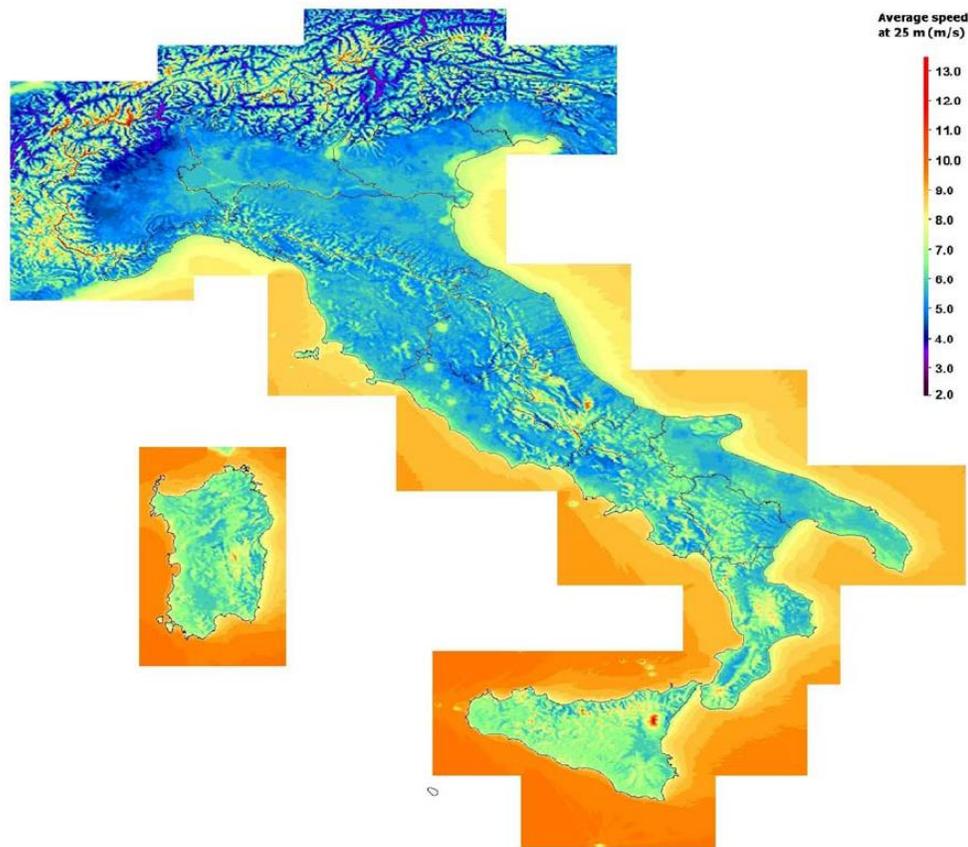


# VENTO: COME SI CLASSIFICA

Il vento si classifica  
in base alla sua  
intensità e  
direzione.

grado	velocità (km/h)	tipo di vento	velocità (nodi)	Caratteri	velocità (m/s)
0	0 - 1	calma	0 - 1	il fumo ascende verticalmente; il mare è uno specchio.	< 0.3
1	1 - 5	bava di vento	1 - 3	il vento devia il fumo; increspature dell'acqua.	0.3 - 1.5
2	6 - 11	brezza leggera	4 - 6	le foglie si muovono; onde piccole ma evidenti.	1.6 - 3.3
3	12 - 19	brezza	7 - 10	foglie e rametti costantemente agitati; piccole onde, creste che cominciano ad infrangersi.	3.4 - 5.4
4	20 - 28	brezza vivace	11 - 16	il vento solleva polvere, foglie secche, i rami sono agitati; piccole onde che diventano più lunghe.	5.5 - 7.9
5	29 - 38	brezza tesa	17 - 21	oscillano gli arbusti con foglie; si formano piccole onde nelle acque interne; onde moderate allungate.	8 - 10.7
6	39 - 49	vento fresco	22 - 27	grandi rami agitati, sibili tra i fili telegrafici; si formano marosi con creste di schiuma bianca, e spruzzi.	10.8 - 13.8
7	50 - 61	vento forte	28 - 33	interi alberi agitati, difficoltà a camminare contro vento; il mare è grosso, la schiuma comincia ad essere sfilacciata in scie.	13.9 - 17.1
8	62 - 74	burrasca moderata	34 - 40	rami spezzati, camminare contro vento è impossibile; marosi di altezza media e più allungati, dalle creste si distaccano turbini di spruzzi.	17.2 - 20.7
9	75 - 88	burrasca forte	41 - 47	camini e tegole asportati; grosse ondate, spesse scie di schiuma e spruzzi, sollevate dal vento, riducono la visibilità.	20.8 - 24.4
10	89 - 102	tempesta	48 - 55	rara in terraferma, alberi sradicati, gravi danni alle abitazioni; enormi ondate con lunghe creste a pennacchio.	24.5 - 28.4
11	103 - 117	fortunale	56 - 63	raro, gravissime devastazioni; onde enormi ed alte, che possono nascondere navi di media stazza; ridotta visibilità.	28.5 - 32.6
12	oltre 118	uragano	64 +	distruzione di edifici, manufatti, ecc.; in mare la schiuma e gli spruzzi riducono assai la visibilità.	32.7 +

# MAPPA DELLE VELOCITÀ DEI VENTI



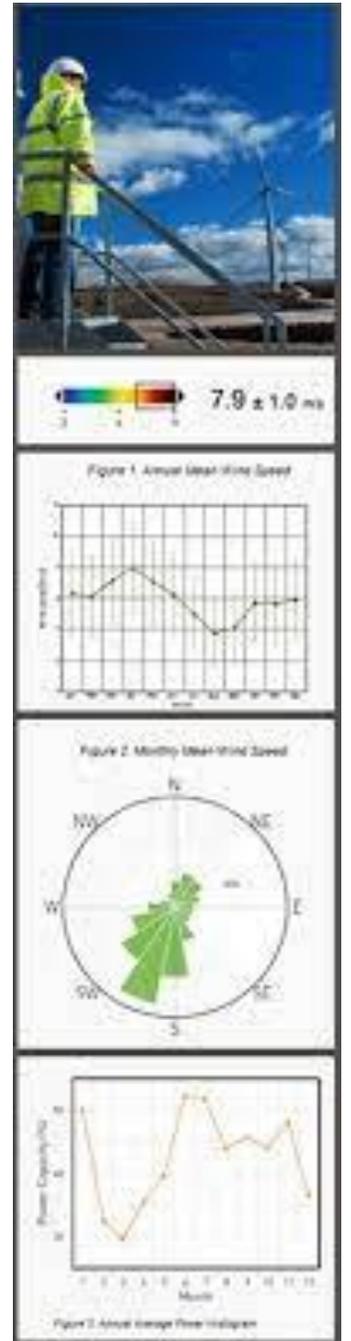
Località		Periodo rilevazione mesi	Velocità media annua del vento (m/s)	Località		Periodo rilevazione mesi	Velocità media annua del vento (m/s)
San Gavino	(CA)	62	4.0	Nago	(TN)	41	4.6
Uras	(CA)	14	4.0	P. Mandrioli	(FO)	24	2.8
Unia	(SS)	71	4.9	Scopeto	(GR)	40	5.4
Campeda	(OR)	71	3.7	Le Porte	(GR)	51	5.6
Monte Arci	(OR)	71	5.7	Cingoli	(MC)	31	4.8
Sant'Anna	(OR)	67	3.5	Macerata	(MC)	31	3.6
Cirras	(OR)	72	5.1	Frosolone	(IS)	31	6.7
Santa Gilla	(CA)	65	5.6	Capracotta	(IS)	27	6.3
S. Caterina	(CA)	70	5.4	Campomarino	(CB)	28	5.1
Capo Sandalo	(CA)	65	7.4	Salcito	(CB)	28	4.7
Fiume Santo	(SS)	45	5.0	Campolieto	(CB)	28	5.5
S. Antioco	(CA)	21	5.6	Catanzaro	(CZ)	24	4.6
Aritzo	(NU)	20	6.5	Barrittieri	(RC)	28	4.6
Tuili	(CA)	23	5.3	Camigliatello	(CS)	24	4.5
Vetan	(AO)	37	1.8	S. Demetrio C.	(CS)	11	6.0
Garin	(AO)	38	3.4	Foggia	(FG)	14	6.8
Verres	(AO)	39	3.0	Salina	(ME)	52	4.6
Verrayes	(AO)	37	2.2	Mazara	(TP)	52	5.3
Deffeyes	(AO)	38	2.6	Filicudi	(ME)	49	3.6
Torbole	(TN)	42	3.9	Ginostra	(ME)	34	3.3
				M. Capellino	(GE)	31	2.8

Fig. A2 – mappa WINDS della velocità media annua del vento a 25 m s.l.t.

# IDONEITÀ DEI SITI

Prima di scegliere un luogo per l'installazione di un impianto eolico è necessario effettuare un'indagine anemologica, per valutarne la sua idoneità. Essa richiede:

- ❑ velocità del vento superiore ai 4 m/s per almeno un centinaio di giorni all'anno
- ❑ regolarità dei venti
- ❑ bassi costi di trasporto (siti di produzione non lontani dai luoghi di utilizzo).



# CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA DI UN SITO

Viene effettuata rilevando i valori delle velocità per periodi molto lunghi (almeno 5 anni), con passo orario o sub-orario, ed organizzandoli in classi di frequenze annuali o pluriennali, costruendo le distribuzioni:

- **delle frequenze**: numero di ore in cui la velocità assume un determinato valore
- **delle frequenze cumulata**: numero di ore in cui la velocità è minore di un determinato valore
- **di durata**: numero di ore in cui la velocità raggiunge o supera un determinato valore



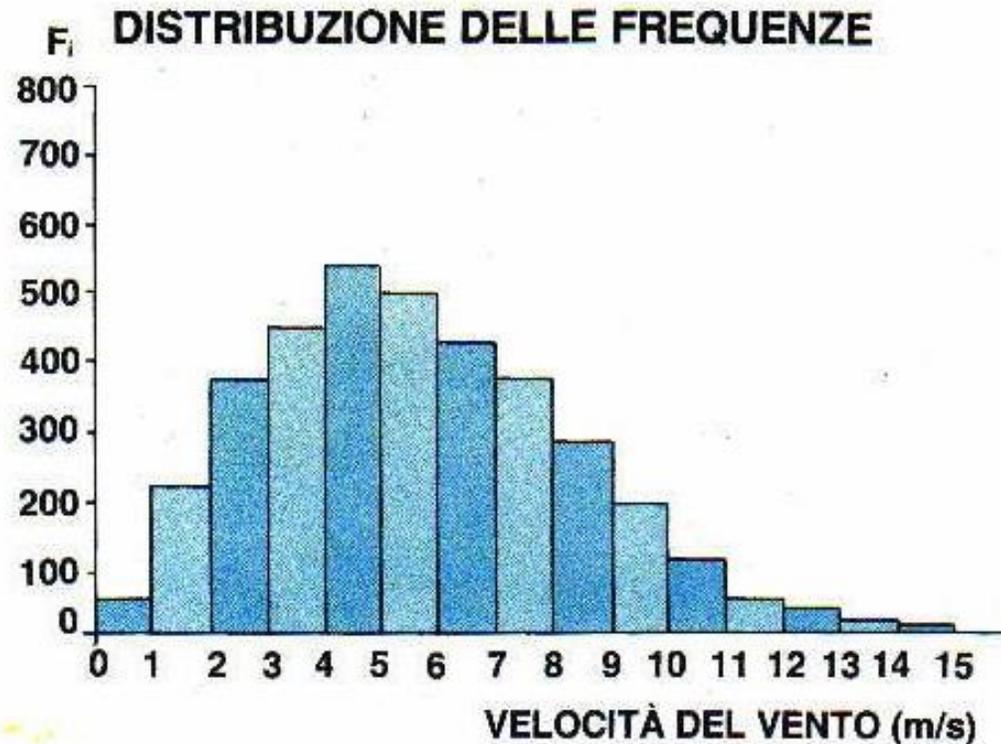
# MODELLI PROBABILISTICI

Le distribuzioni delle velocità vengono interpretate con modelli probabilistici (curve):

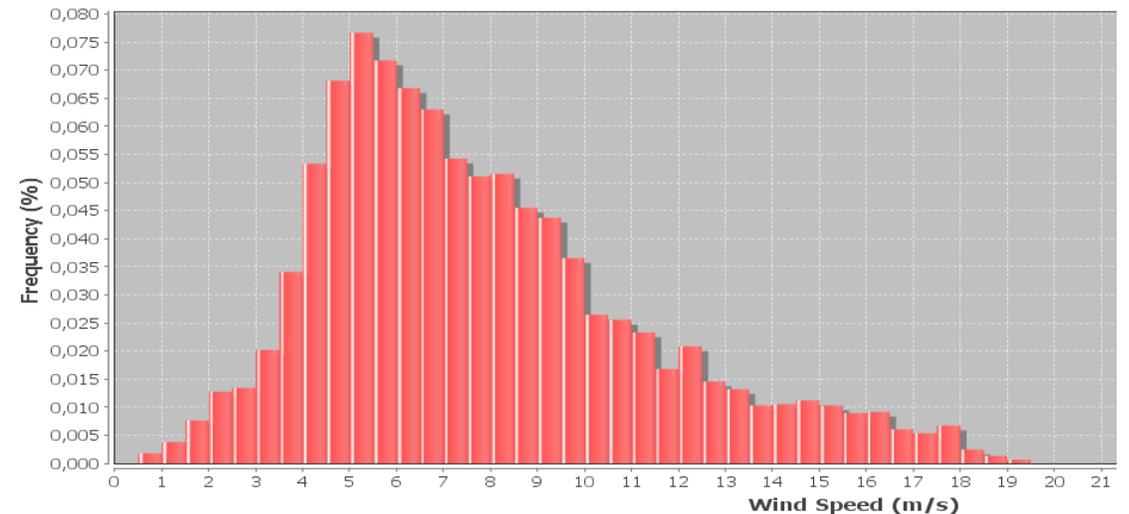
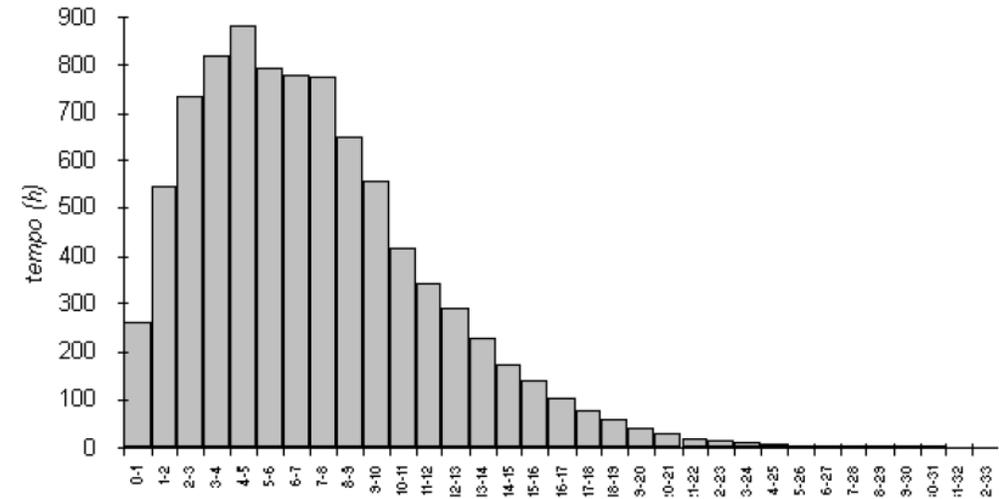
- ❖ **di frequenza**: percentuale di tempo in cui si è verificata una determinata velocità
- ❖ **di frequenza cumulata**: numero di ore in cui la velocità è minore o uguale ad un valore considerato. Tende ad 1 per velocità estreme
- ❖ **di durata**: numero di ore in cui un determinato valore di velocità viene raggiunto o superato

Tutte le curve possono esprimersi in termini percentuali.

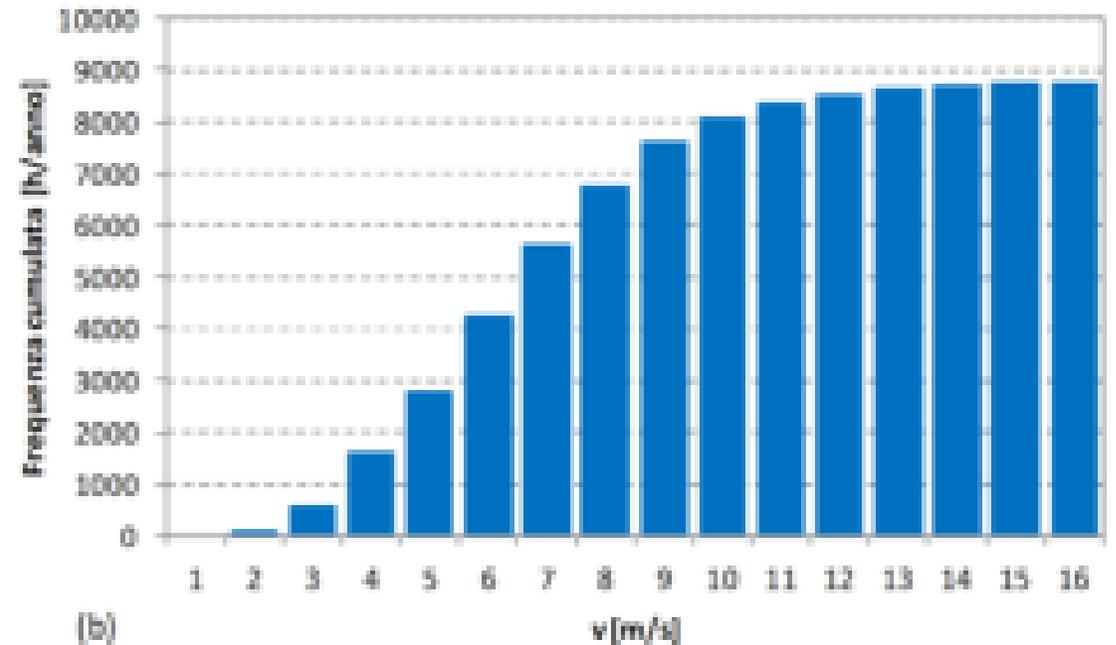
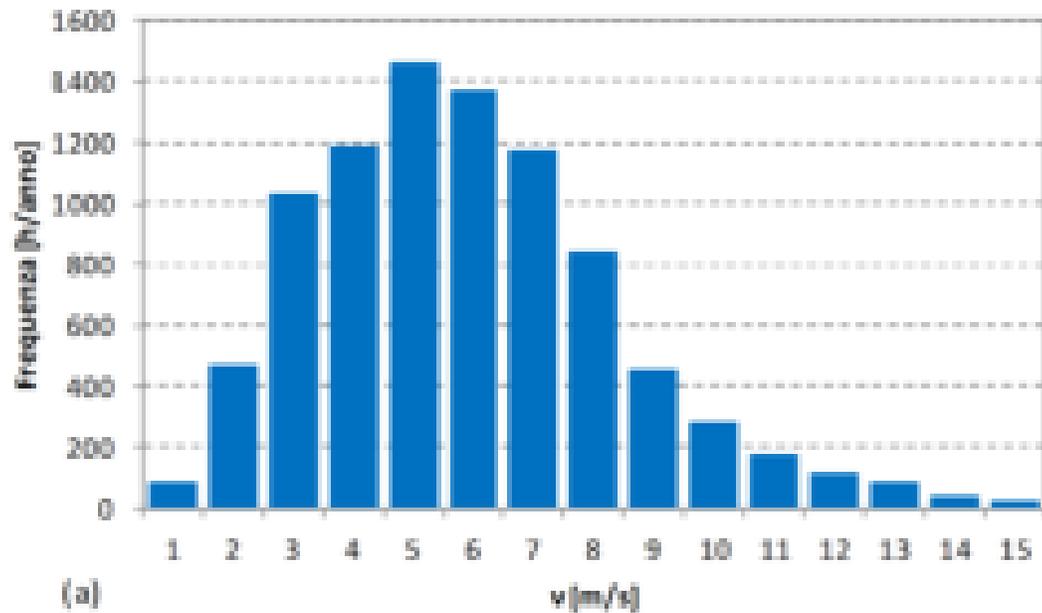
# DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE



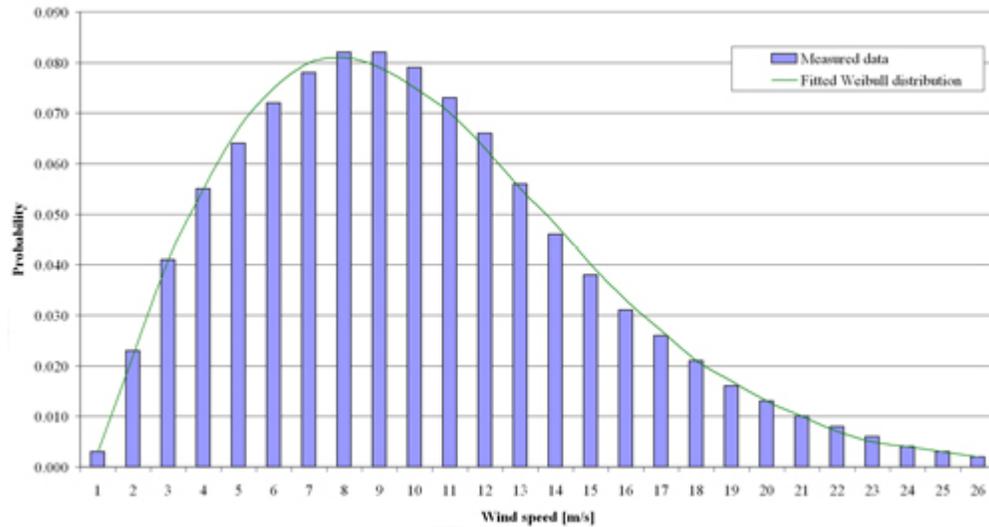
Percentuale di tempo in cui si è verificata una velocità  $v$



# DISTRIBUZIONE DELLE FREQUENZE CUMULATA

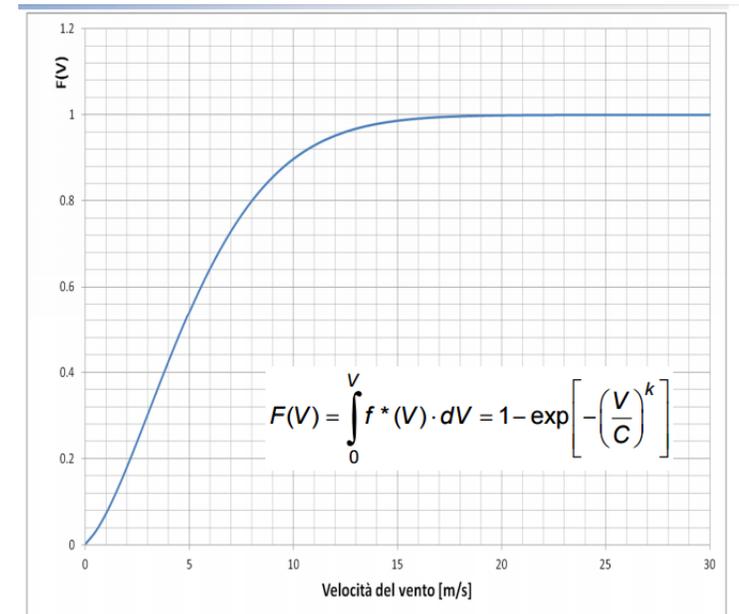


# DISTRIBUZIONI E CURVE



Curva di frequenza o di Weibull

Curva di durata



Curva di frequenza cumulata

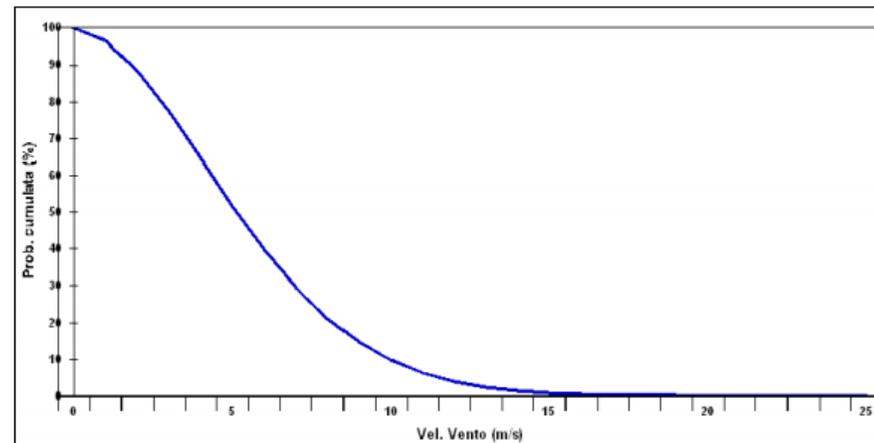
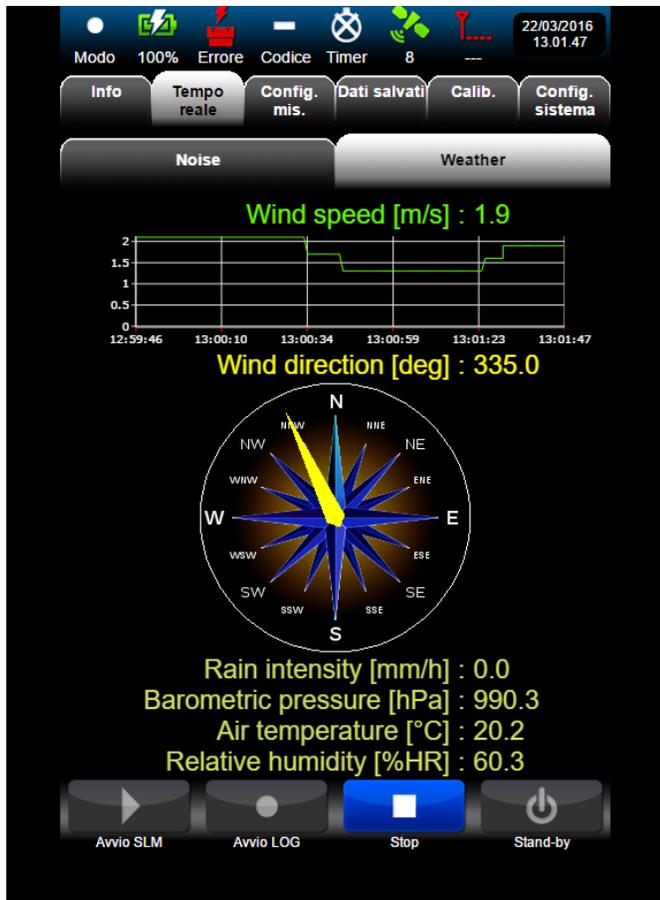


Fig. 5 - Esempio di probabilità cumulata (o curva di durata) di Weibull.

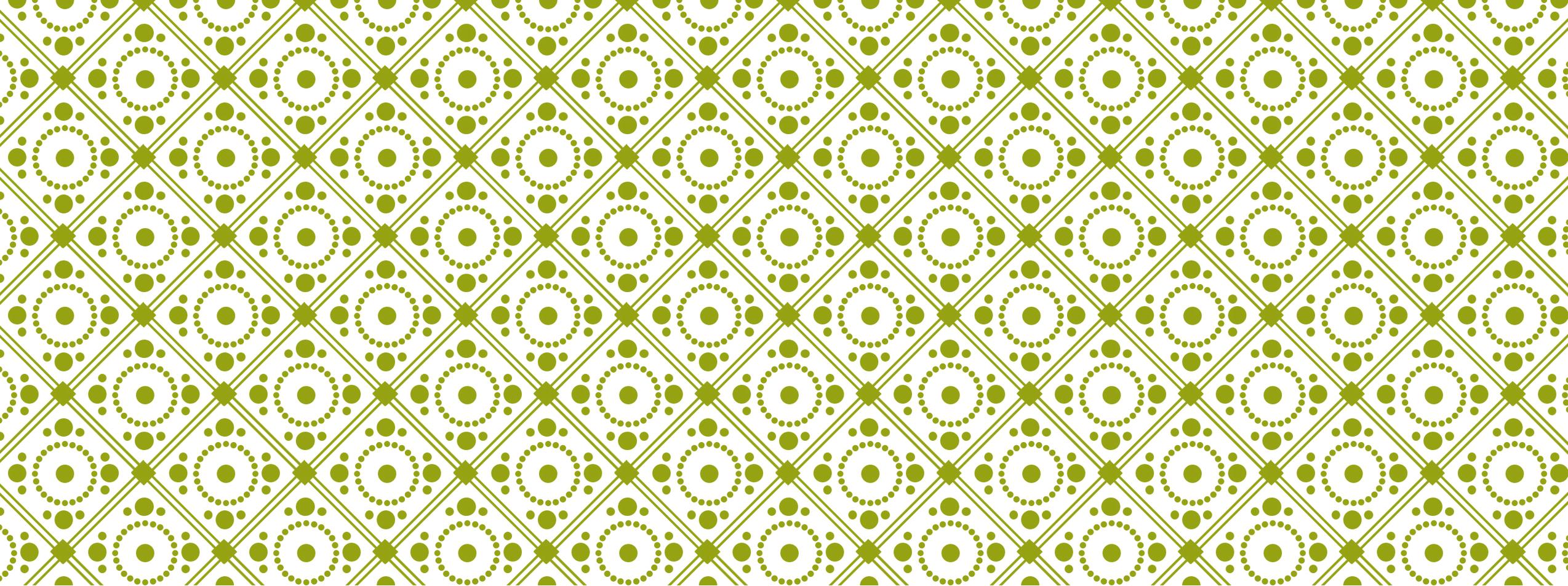
# COME SI MISURA IL VENTO

Lo strumento per misurare la velocità del vento è l'anemometro.



THE ROBINSON ANEMOMETER.



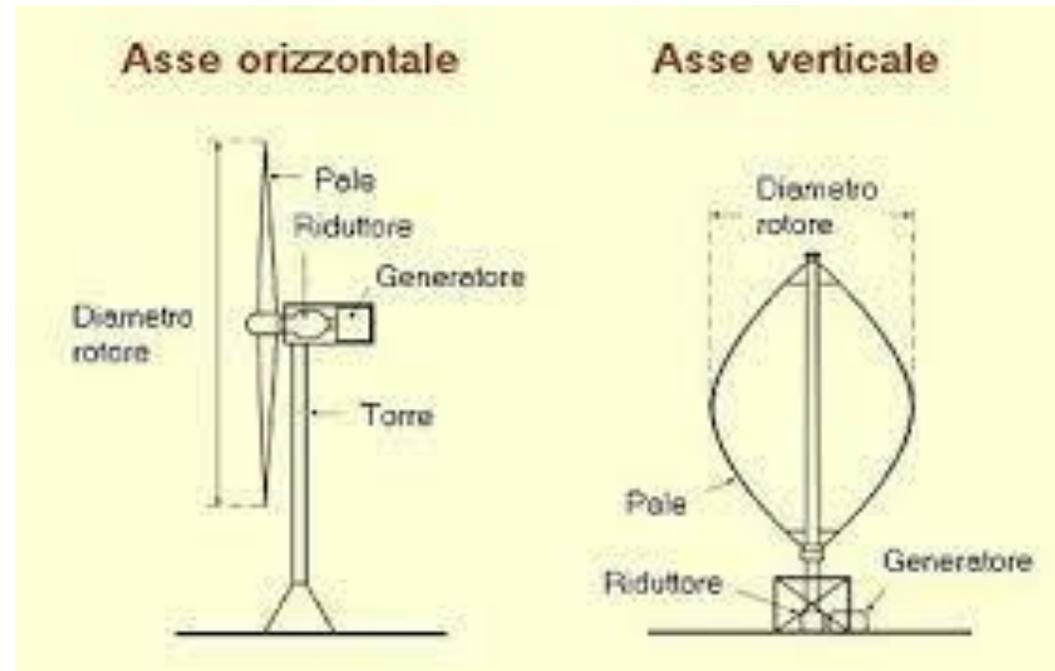


# GLI IMPIANTI EOLICI



# ENERGIA EOLICA

L'energia cinetica ottenuta dalle correnti d'aria viene trasformata in altre forme di energia (meccanica rotazionale o elettrica), per mezzo degli aerogeneratori.



# GENERATORI AD ASSE ORIZZONTALE O VERTICALE

## Asse verticale

- sono omnidirezionali
- hanno tutta l'attrezzatura meccanica di controllo a livello del suolo e quindi è più facile effettuare la manutenzione



## Asse orizzontale

- hanno bisogno di orientarsi per ricevere il vento ortogonalmente al rotore
- hanno l'attrezzatura meccanica in alto
- hanno potenza ed efficienza maggiore ( $> 40\%$ ) rispetto a quelli ad asse verticale

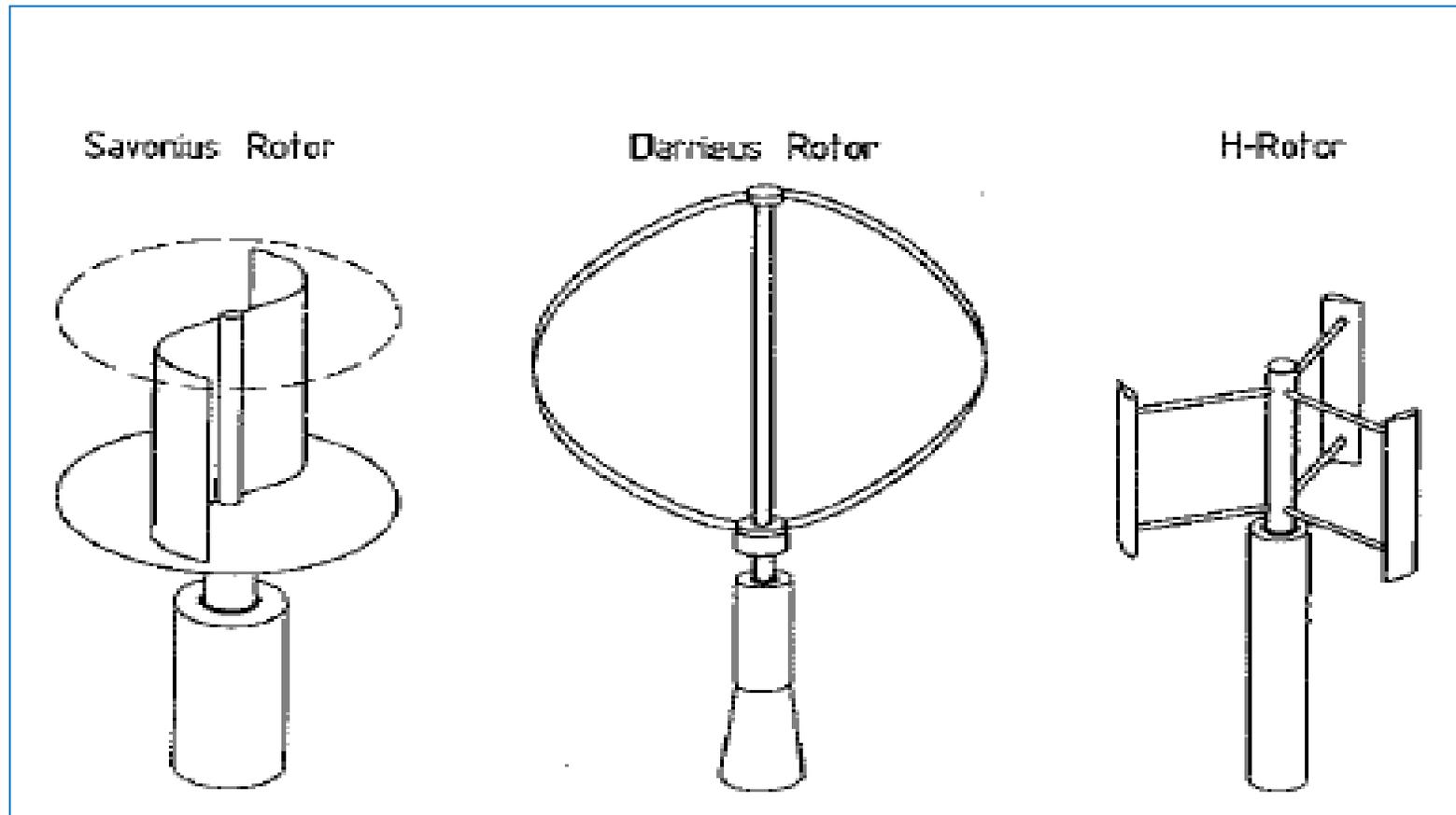


# GENERATORI AD ASSE VERTICALE

- hanno potenze dell'ordine delle decine di kW, minori di minori di quelle delle macchine ad asse orizzontale
- hanno una ridotta quantità di parti mobili nella struttura: ciò conferisce elevata resistenza alle forti raffiche di vento, ad alte velocità e turbolenze, e possibilità di sfruttare qualsiasi direzione, senza doversi orientare di continuo
- sono molto versatili, adatti sia all'uso domestico che alla produzione centralizzata di energia



# GENERATORI AD ASSE VERTICALE

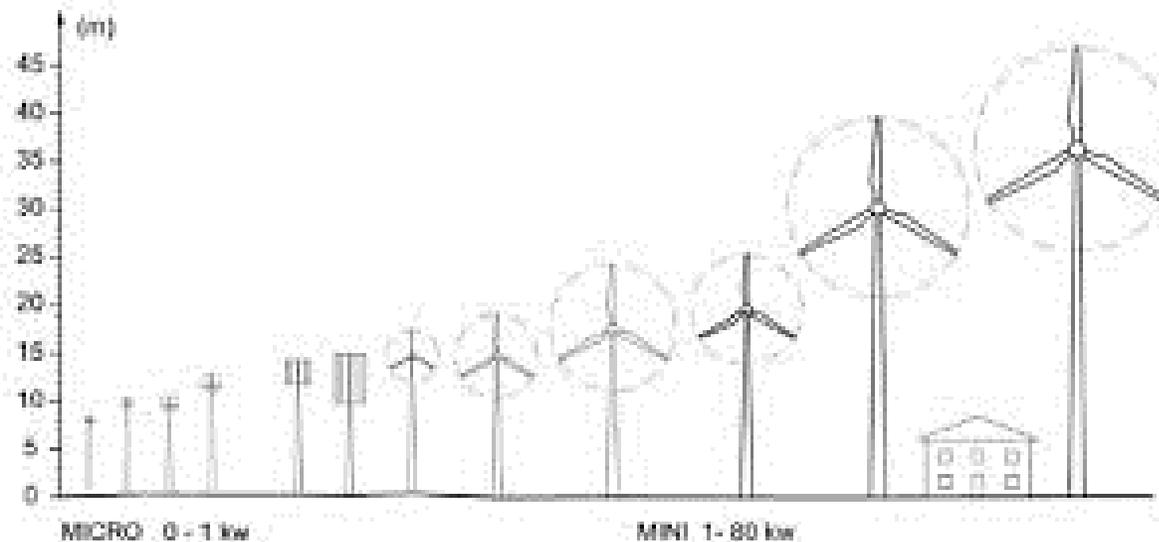


# MINIEOLICO E MICROEOLICO

**Minieolico** → impianti con potenza nominale  $20 \text{ kW} < P < 200 \text{ kW}$

**Microeolico** → impianti con potenza nominale  $P < 20 \text{ kW}$

Hanno piccole dimensioni, adatte ad uso familiare, ma prezzi di installazione più elevati (1500 - 3000 €/kW) essendo il loro mercato ancora in via di sviluppo

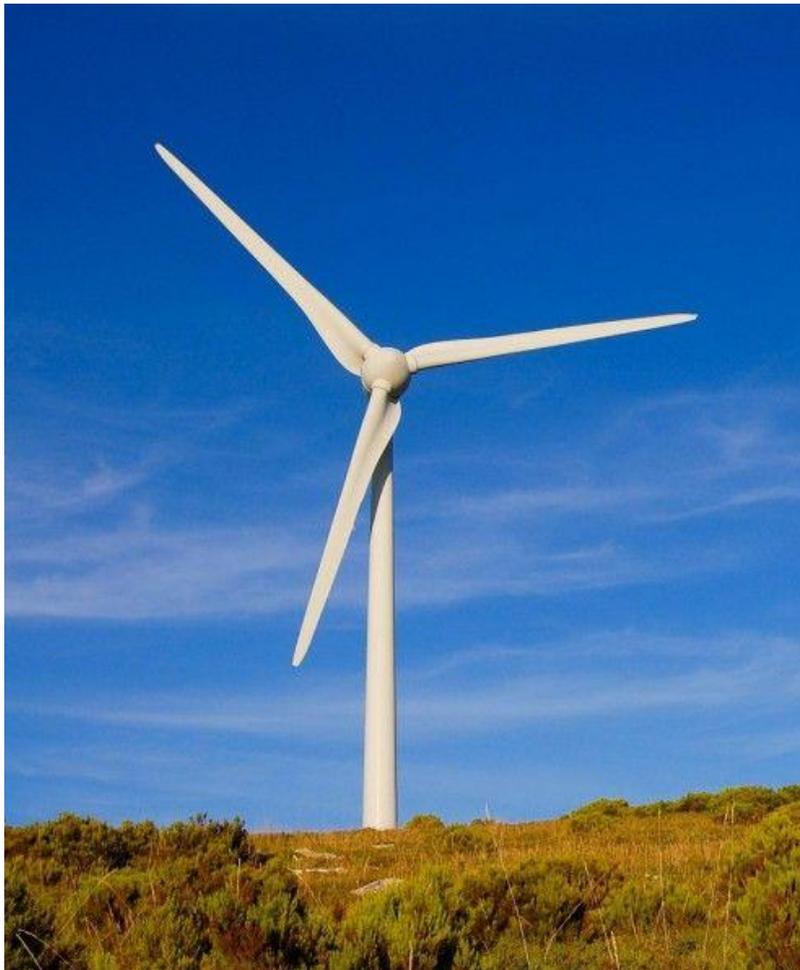


# SCALA DEGLI IMPIANTI

- singole macchine, connesse alla rete (*grid-connected*), o dotate di accumulo elettrico per insediamenti isolati (stand-alone)
- pochi aerogeneratori che alimentano reti locali
- centrali eoliche (wind farms), connesse alla rete con range di potenze molto estesi (20 kW-20 MW). La distanza fra gli aerogeneratori è pari a 5-10 volte il diametro delle pale, per evitare interferenze che potrebbero causare cadute di produzione
- impianti off-shore, costruiti in mare



# SCALA DEGLI IMPIANTI



Il tipo di aerogeneratore più utilizzato è quello ad asse orizzontale a tre pale, lunghe circa 20 m.

## Taglia piccola

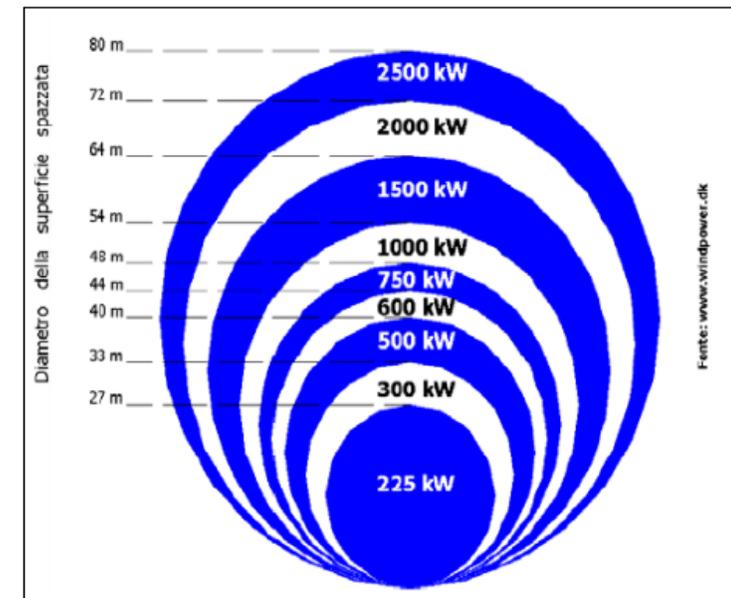
P: 1-100 kW  
Diametro: 3-20 m  
Altezza: 10-20 m

## Taglia media

P: 100 kW -1 MW  
Diametro: 20-50 m  
Altezza: 20-50 m

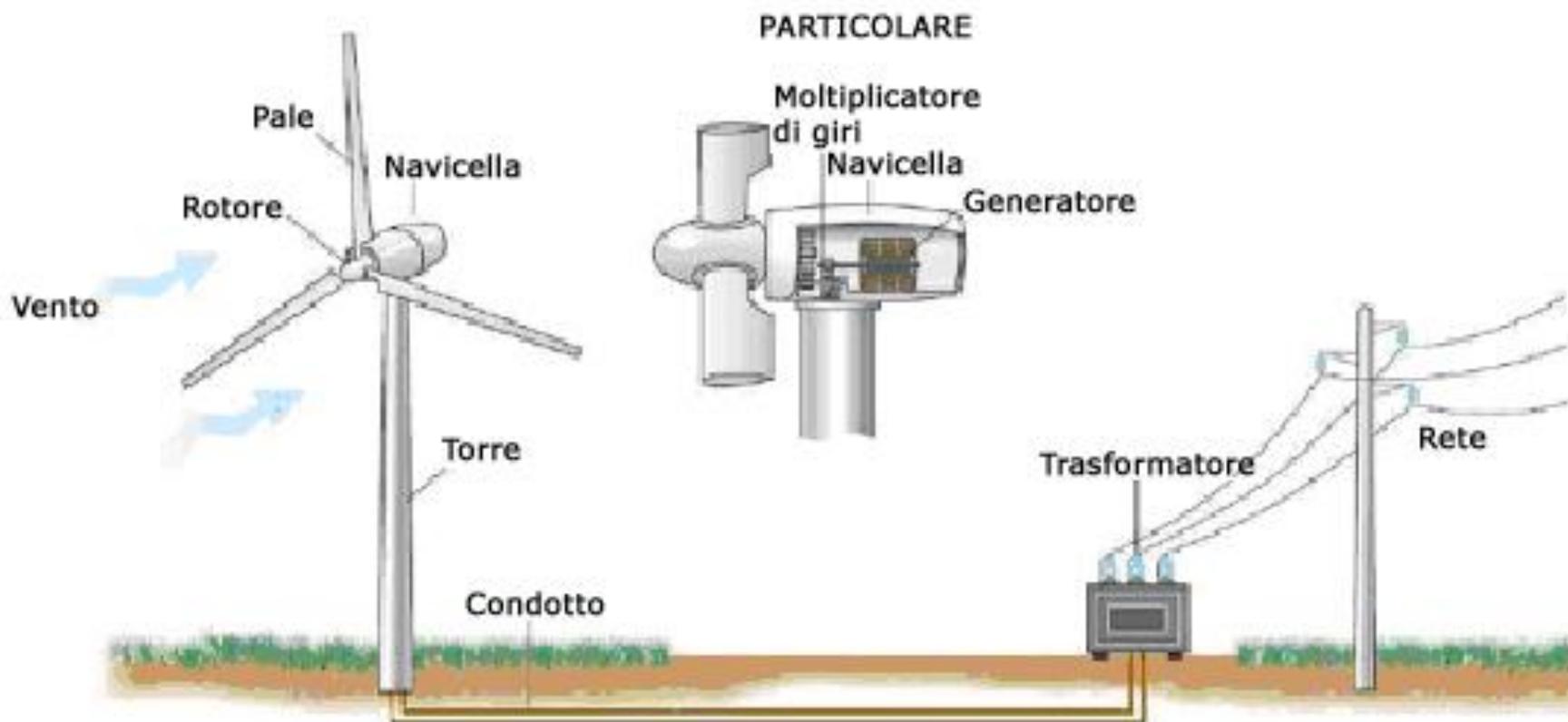
## Taglia grande

P: > 1 MW  
Diametro: 55-70 m  
Altezza: 60-120 m

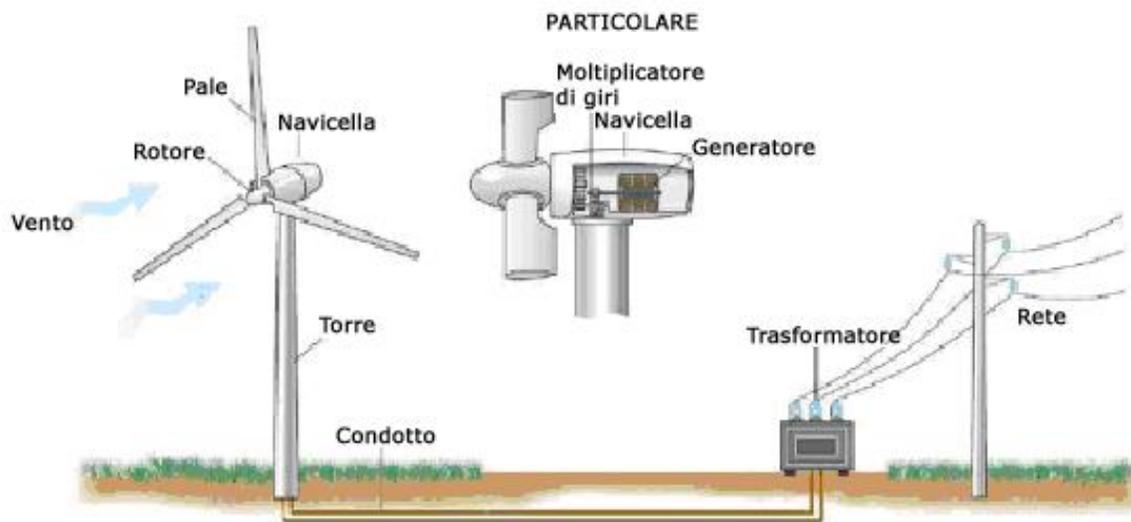


g. 12 - Schema di corrispondenza tra la potenza e il diametro di un aerogeneratore.

# COMPONENTI DEGLI AEROGENERATORI



# COMPONENTI DEGLI AEROGENERATORI



In cima alla torre sono posizionati:

il **rotore**, costituito da un mozzo, su cui sono fissate le pale, agganciato alla navicella.

Essa può ruotare di  $180^\circ$  sul proprio asse, orientandosi nella direzione del vento, e contiene:

- il **moltiplicatore di giri**, che trasforma la rotazione lenta delle pale in una rotazione più veloce
  - il **generatore**, che trasforma l'energia meccanica in energia elettrica
- il **sistema di controllo**, che controlla il funzionamento della macchina e gestisce l'erogazione dell'energia elettrica e l'arresto del sistema oltre certe velocità per motivi di sicurezza
  - il **sistema frenante**

La **torre** di sostegno può essere a traliccio o a pilone tubolare. Più è alta migliori sono le condizioni di ventosità. Con l'altezza cresce però la sezione e la fondazione deve essere quindi più stabile.

# NAVICELLA



# ROTORE E NUMERO DI PALE

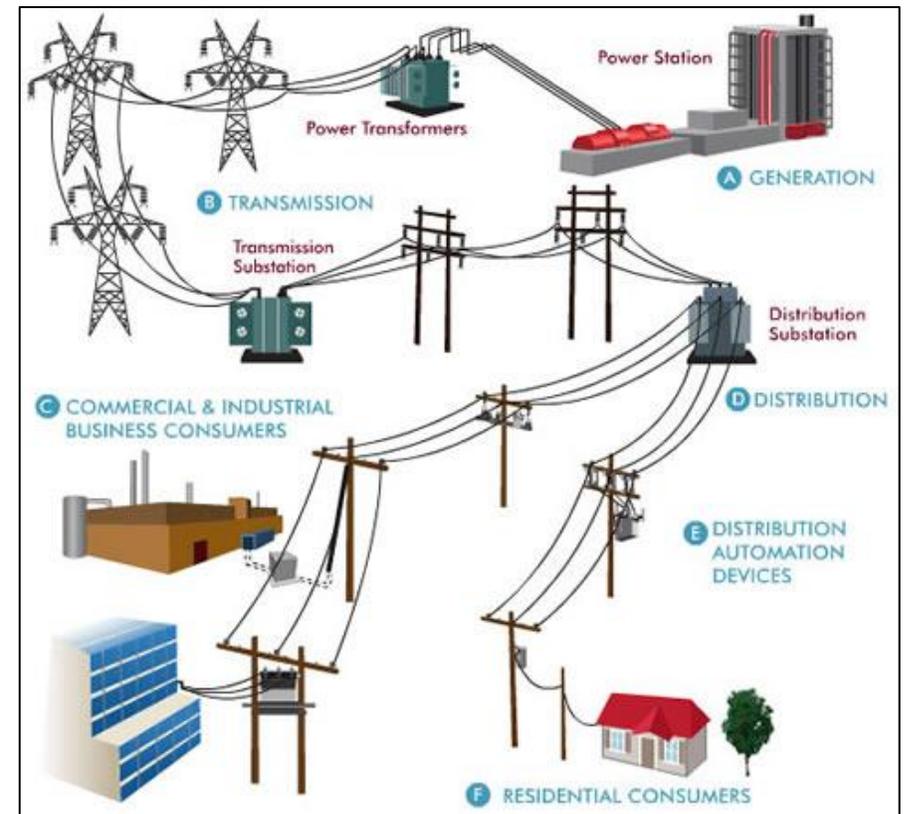
Il rotore è costituito da un certo numero di pale (1, 2 o 3), di varie lunghezze, fissate su un mozzo. Le pale sottraggono al vento energia cinetica e la trasformano in energia meccanica di rotazione. Esistono impianti:

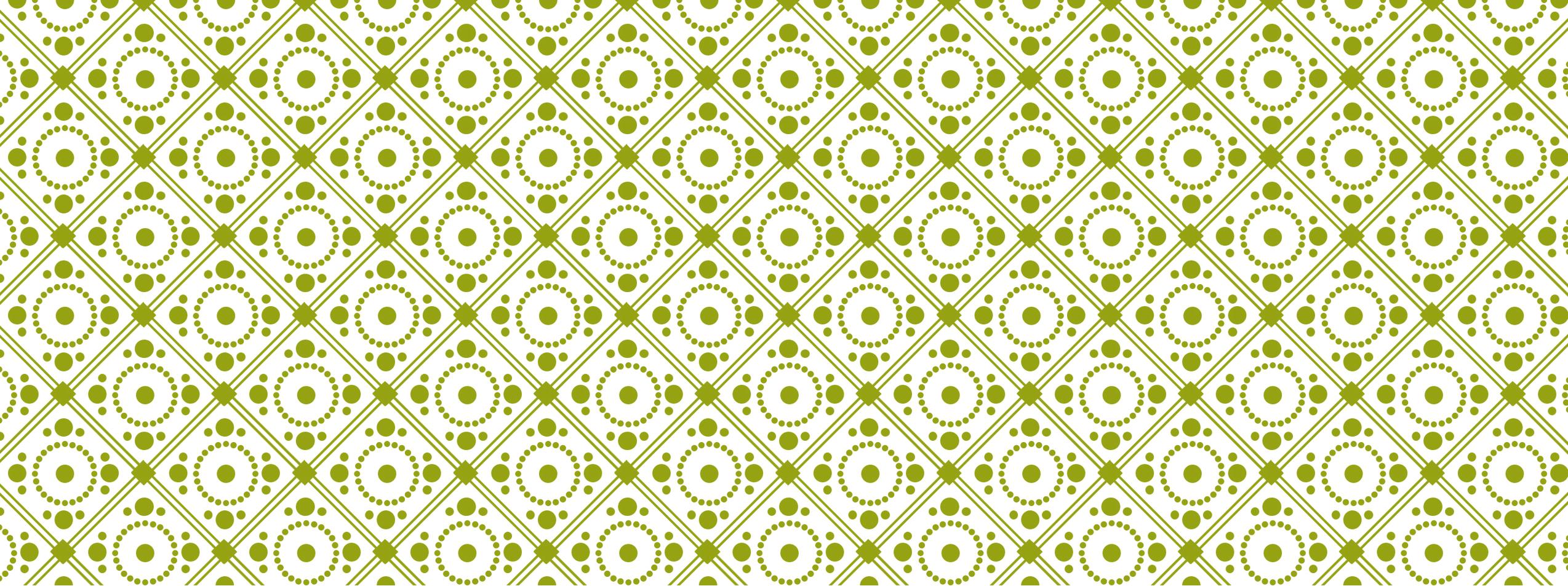
- ❑ monopala, con contrappeso: sono le più economiche, ma essendo sbilanciate generano rilevanti sollecitazioni meccaniche e rumore; sono poco diffusi
- ❑ bipala: hanno due pale poste a  $180^\circ$  tra loro, ossia nella stessa direzione, ma con verso opposto. Hanno costo e prestazioni intermedie rispetto alle altre due tipologie; sono le più diffuse per installazioni minori
- ❑ tripala: hanno tre pale poste a  $120^\circ$  una dall'altra: sono costose, ma essendo bilanciate, non causano sollecitazioni scomposte e sono affidabili e silenziose. Sono le più diffuse

# INTERMITTENZA PRODUZIONE EOLICA

La produzione eolica, essendo discontinua e non programmabile, non può sostituire completamente le fonti tradizionali, quali combustibili fossili o energia idroelettrica, che erogano potenza costante o modulabile in base alle esigenze.

Pertanto trova il suo ambito applicativo principalmente nell'integrazione di reti esistenti, per soddisfare la necessità di potenza di picco.





# PRODUZIONE DI ENERGIA DA EOLICO



# PRODUZIONE ENERGETICA

La potenza  $P$  disponibile in una vena fluida è data dal prodotto della sua portata  $G$  per l'energia  $E$  posseduta dalla sua unità di volume  $V$

$$P(W) = G \left( \frac{m^3}{s} \right) \times E \left( \frac{J}{m^3} \right) = (A \times v) \times \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \right)$$

- $G$  è data dal prodotto della velocità  $v$  del vento per l'area  $A$  della sezione di fluido perpendicolare alla direzione del moto
- $E$  è data dal prodotto dell'energia cinetica della vena  $E_c = \frac{1}{2} mv^2$  per unità di volume  $v$  ( $\rho$  è la densità dell'aria)

$$P(W) = 0,613 A \times v^3 = 0,613 \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \times v^3$$

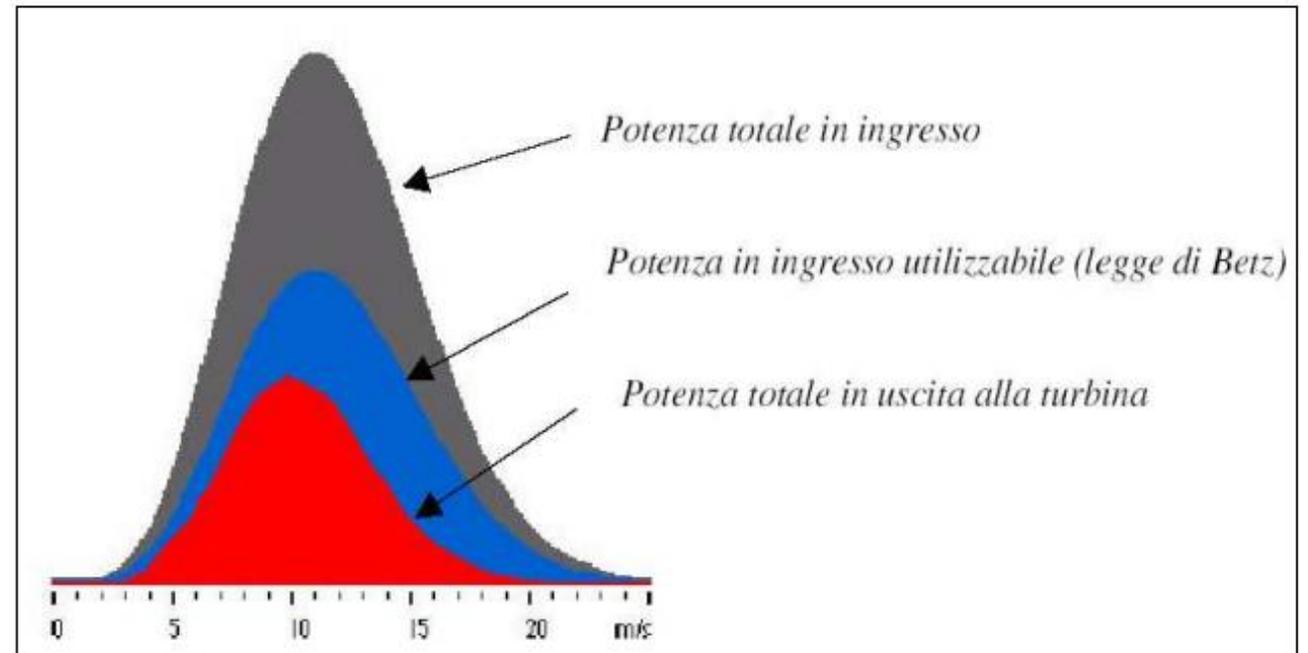
Con  $d$  diametro del disco investito dalla massa d'aria

# EFFICIENZA

La potenza massima teorica associabile ad una massa d'aria in movimento non può essere interamente sfruttata a causa di vari tipi di perdite di tipo dissipativo (attriti, turbolenze) o dovute alla presenza delle pale, che riducono la sezione di passaggio.

La potenza teorica massima  $P_{es}$  che si può estrarre dal vento con un aerogeneratore è pari al 59,3% di quella che lo investe  $P_v$  (legge di Betz).

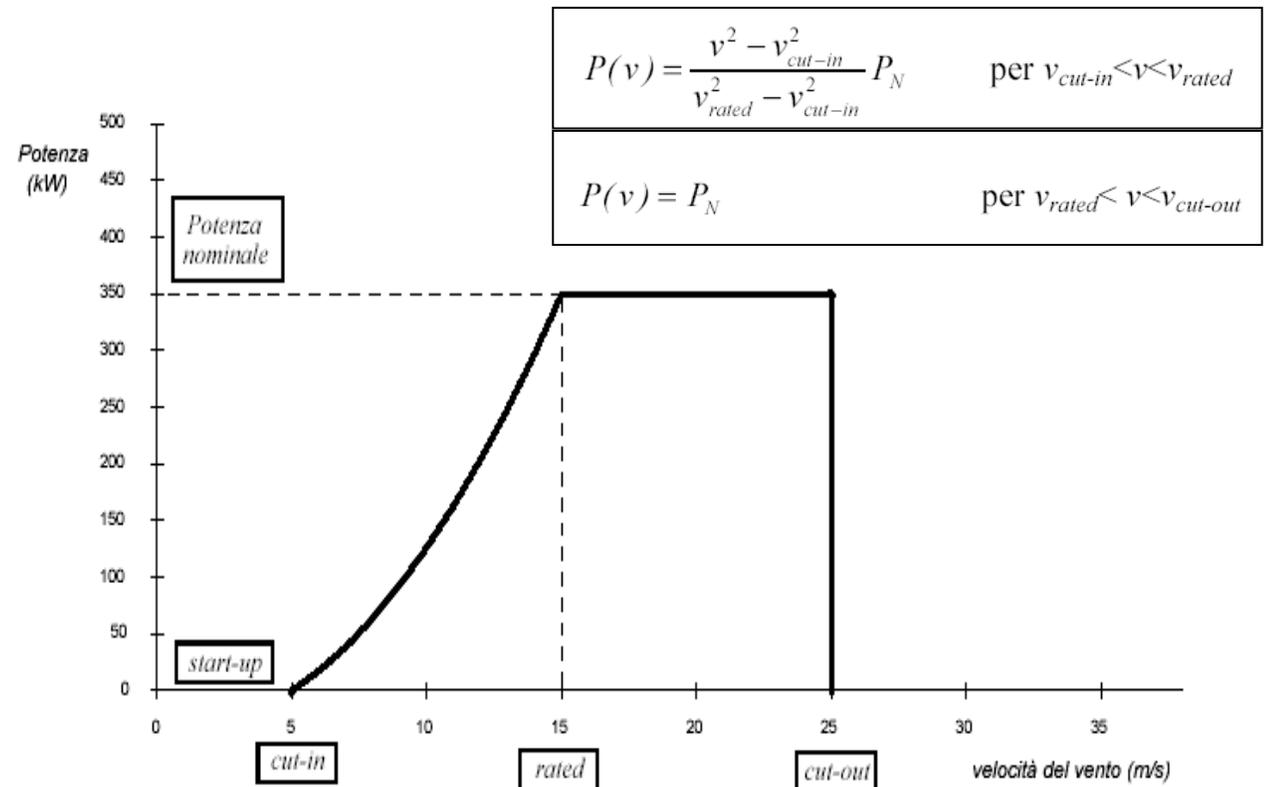
Il rapporto  $P_{es}/P_v$  rappresenta l'efficienza del generatore. Valori di efficienza pari a 0,4-0,5 sono in pratica considerati ottimi



# CURVA DI POTENZA

Esprime la potenza elettrica resa ai morsetti del generatore in funzione della velocità del vento. Nella curva si distinguono:

- velocità di avviamento (**start-up**), a cui il rotore entra in moto
- velocità di inserimento (**cut-in**), a cui inizia a produrre energia
- velocità nominale (**rated**) a cui viene resa la potenza nominale, corrispondente al massimo rendimento
- velocità di stacco (**cut-out**) a cui intervengono i meccanismi di sicurezza per bloccare il rotore



Con velocità medie di 5-6 m/s, si ha una produzione annua di 1.000-1.800 kWh/kW di potenza nominale.

# COSTI DI UN IMPIANTO EOLICO

- Installazione di un impianto eolico orizzontale da 1-3 kW: da € 1.000 a € 10.500;
- Installazione di un impianto eolico verticale da 1-3 kW: da € 2.000 a € 13.500.
- Costo della potenza installata: circa **1500 €/kW**; per impianti micro-eolici: **2000-3500 €/kW**.

Il costo per ogni kW installato cresce in modo inversamente proporzionale alla potenza installata. Ovvero: maggiore la potenza, minore il costo unitario per kW. Un generatore di piccole dimensioni da 200 kW, ad esempio, costa meno di un mini impianto da 20 kW.

A tutto ciò si affiancano i costi di manutenzione. Di norma, gli interventi di controllo e verifica di buon funzionamento dell'impianto andrebbero svolti almeno due volte l'anno.



# IMPATTO AMBIENTALE



1. Non generano inquinamento atmosferico
2. Il principale impatto è dovuto all'intrusione visiva sul paesaggio
3. L'occupazione del suolo può risultare notevole a causa della distanza (ca. 7 diametri) a cui vanno poste le macchine per evitare interferenze aerodinamiche. Tuttavia l'area effettivamente occupata è pari a circa il 10% dell'estensione e può essere quasi integralmente utilizzata per fini agricoli.
4. Possono causare interferenze nelle telecomunicazioni, nella navigazione aerea e nei ponti radio (per escluderle la distanza dall'impianto di trasmissione/ripetizione deve essere pari almeno a 5 km)
5. Generano un moderato impatto acustico
6. Possono causare la morte di specie avicole e, in caso di rottura, danneggiare le colture