

# Energia eolica



# Generalità

Quando, per effetto delle radiazioni solari, una zona della superficie terrestre si riscalda più di quelle circostanti, l'aria si dilata, diviene più leggera e la pressione localmente diminuisce.

Dalle zone vicine, allora, convergono masse d'aria più fredde, spinte dalla differenza di pressione il loro moto di trasferimento si manifesta come vento.

Come massa energetica primaria, il vento presenta alcune caratteristiche sfavorevoli :

- **bassa concentrazione**
- **irregolarità**
- **incostanza in velocità e direzione**
- **impossibilità di accumulazione diretta**

Allo stesso tempo, però, esso presenta un'importante caratteristica:

**assoluta disponibilità all'utilizzazione**

Proprio per tale caratteristica lo sfruttamento di questo fenomeno naturale risale ad epoche lontanissime.

# Cenni storici

- Gli antesignani degli attuali aerogeneratori sono i mulini a vento ad asse verticale usati negli altopiani dell'Afghanistan per la macinazione dei cereali, fin dal VII° secolo a.C
- I primi reperti storici di mulini ad asse orizzontale si collocano in Persia, Tibet e Cina , datati circa nell'anno 1000.
- I primi mulini europei ad asse orizzontale fecero comparsa in Inghilterra circa nell'anno 1150, in Francia nel 1180, nei Paesi Bassi nel 1190, in Germania nel 1222 ed in Danimarca nel 1259.
- In Europa, le prestazioni dei mulini a vento incrementarono costantemente dal XII° al XIX° Secolo, tanto da essere impiegati anche nell'idraulica.
- La Rivoluzione industriale portò lentamente al declino della tecnologia eolica in Europa, ma contemporaneamente, grazie agli insediamenti degli emigranti europei, i mulini a vento, con opportune migliorie tecniche, si affermarono negli Stati Uniti.
- I primi studi scientifici sono dovuti allo studioso danese Le Cour che mise a punto un generatore eolico, del diametro di 22.8 m, ad Askov, in Danimarca (1891-1907).

# Cenni storici

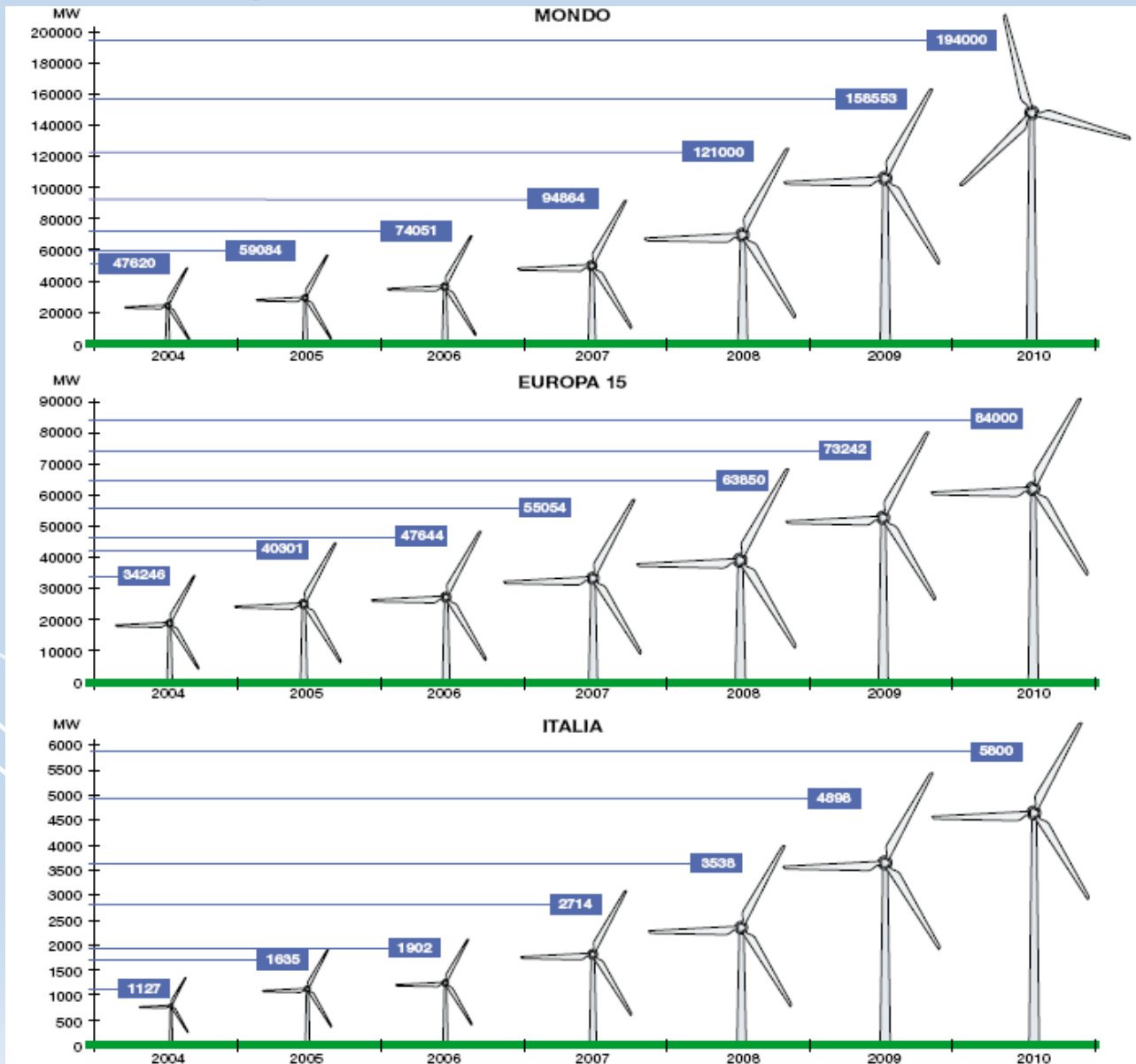
- Nel periodo 1930-1960 furono costruiti una serie di prototipi di turbine eoliche di media e piccola taglia per la produzione di energia elettrica (Usa, Francia, Germania, Danimarca, Gran Bretagna)
- Negli anni '60, lo sviluppo e l'impiego dell'energia eolica subirono una battuta d'arresto, a causa della disponibilità di carbone e petrolio a basso costo: i generatori eolici non erano più competitivi con i combustibili di tipo tradizionale.
- Una rinnovata attenzione all'energia eolica si ebbe con la crisi petrolifera del 1973: molti paesi industrializzati iniziarono programmi di ricerca per stabilire le reali possibilità di sfruttamento di tale energia nell'ambito del loro territorio.
- Durante il decennio 1990-2000, la potenzialità di sfruttamento dell'energia eolica media mondiale è raddoppiata approssimativamente ogni tre anni. **Il costo dell'elettricità generato da energia eolica si è abbattuto a circa 1/6 del valore dei primi anni '80 e tale trend sembra continuare nel tempo.**
- Alcuni studi hanno stimato che la potenzialità eolica totale incrementerà di circa il 25% ogni anno fino al 2005 mentre i costi diminuiranno di un'aliquota pari al 20-40% durante lo stesso periodo di tempo.

# Cenni storici

## *Sviluppo della taglia delle turbine eoliche (1985 – 2005)*

<b>Anno</b>	<b>Potenza nominale (kW)</b>	<b>Diametro rotore (m)</b>
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1500	70
2001-2005	4000-6000	88

# Diffusione dell'eolico nel mondo, nell'Unione Europea e in Italia al 2010



Fonte:  
EWEA

# Capacità mondiale installata riferita a sistemi di sfruttamento eolici nel 2011

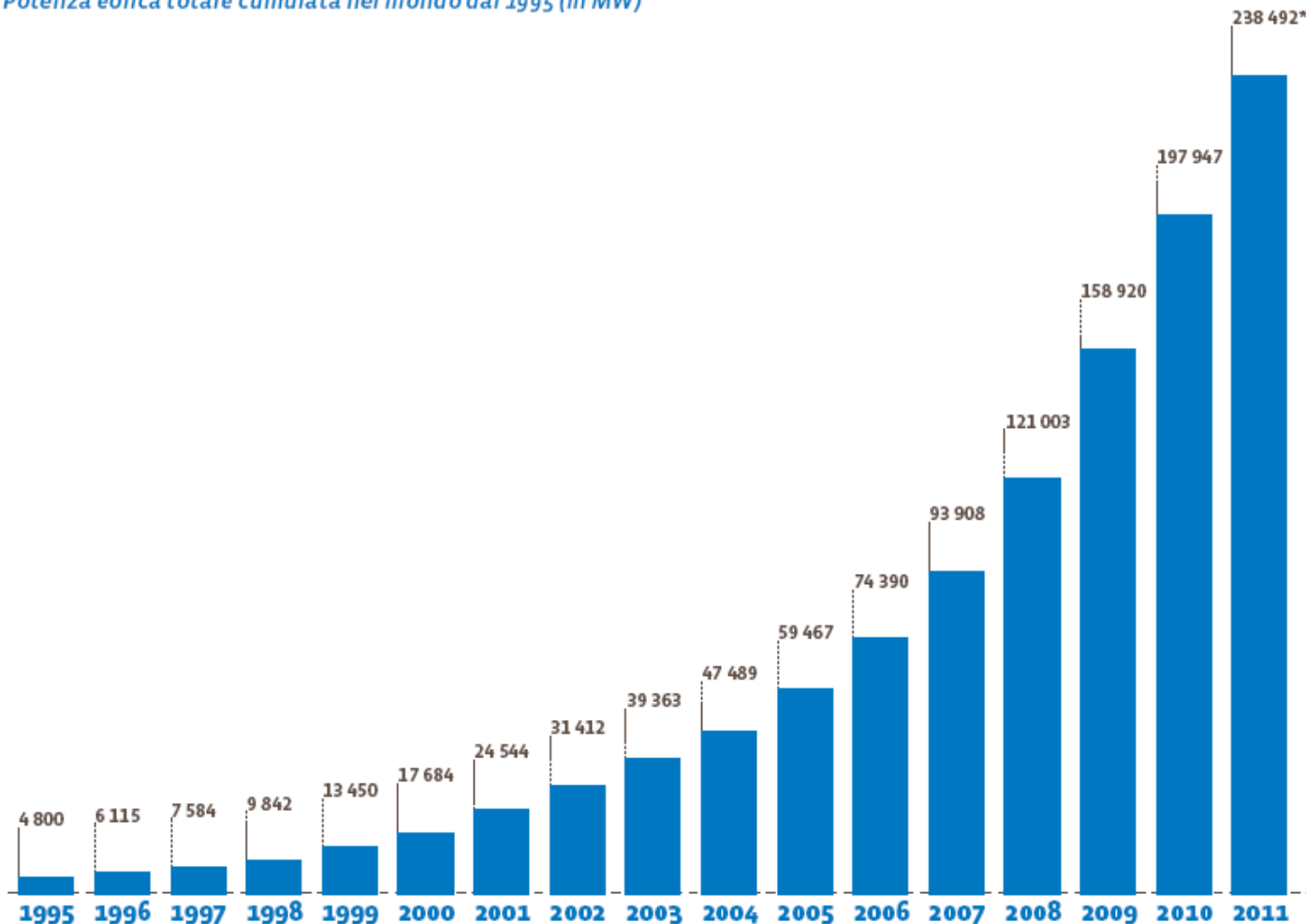
Potenza eolica installata nel mondo a fine 2011\* (in MW)

	2010	2011	Potenza installata nel 2011	Potenza dismessa nel 2011
Unione Europea	84 958,6	94 097,1	9 367,7	229,2
Resto d'Europa	1 997,0	2 659,0	665,0	3,0
<b>Totale Europa</b>	<b>86 955,6</b>	<b>96 756,1</b>	<b>10 032,7</b>	<b>232,2</b>
Stati Uniti	40 298,0	46 919,0	6 810,0	189,0
Canada	4 008,0	5 265,0	1 267,0	10,0
<b>Totale Nord America</b>	<b>44 306,0</b>	<b>52 184,0</b>	<b>8 077,0</b>	<b>199,0</b>
Cina	44 733,0	62 733,0	18 000,0	0,0
India	13 065,0	16 084,0	3 019,0	0,0
Giappone	2 334,0	2 501,0	168,0	1,0
Altri Paesi asiatici	975,0	1 080,0	111,0	6,0
<b>Totale Asia</b>	<b>61 107,0</b>	<b>82 398,0</b>	<b>21 298,0</b>	<b>7,0</b>
<b>Africa e Medio Oriente</b>	<b>1 065,0</b>	<b>1 093,0</b>	<b>31,0</b>	<b>3,0</b>
<b>America Latina</b>	<b>1 997,0</b>	<b>3 203,0</b>	<b>1 206,0</b>	<b>0,0</b>
<b>Regioni del Pacifico</b>	<b>2 516,0</b>	<b>2 858,0</b>	<b>342,0</b>	<b>0,0</b>
<b>Totale mondiale</b>	<b>197 946,6</b>	<b>238 492,1</b>	<b>40 986,7</b>	<b>441,2</b>

\*Stima. Fonte: EurObserv'ER 2012 (dati Unione Europea)/AWEA per gli Stati Uniti, GWEC 2012 (altri)

# Andamento della potenza eolica complessiva nel Mondo-2011

Potenza eolica totale cumulata nel mondo dal 1995 (In MW)

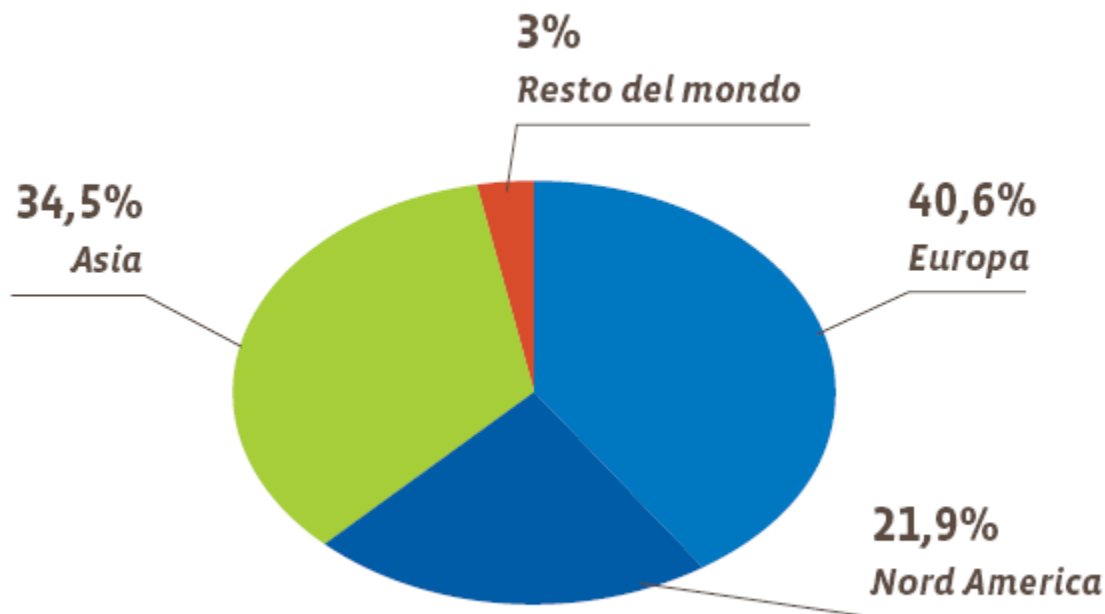


\*Stima. Fonte: EurObserv'ER 2012



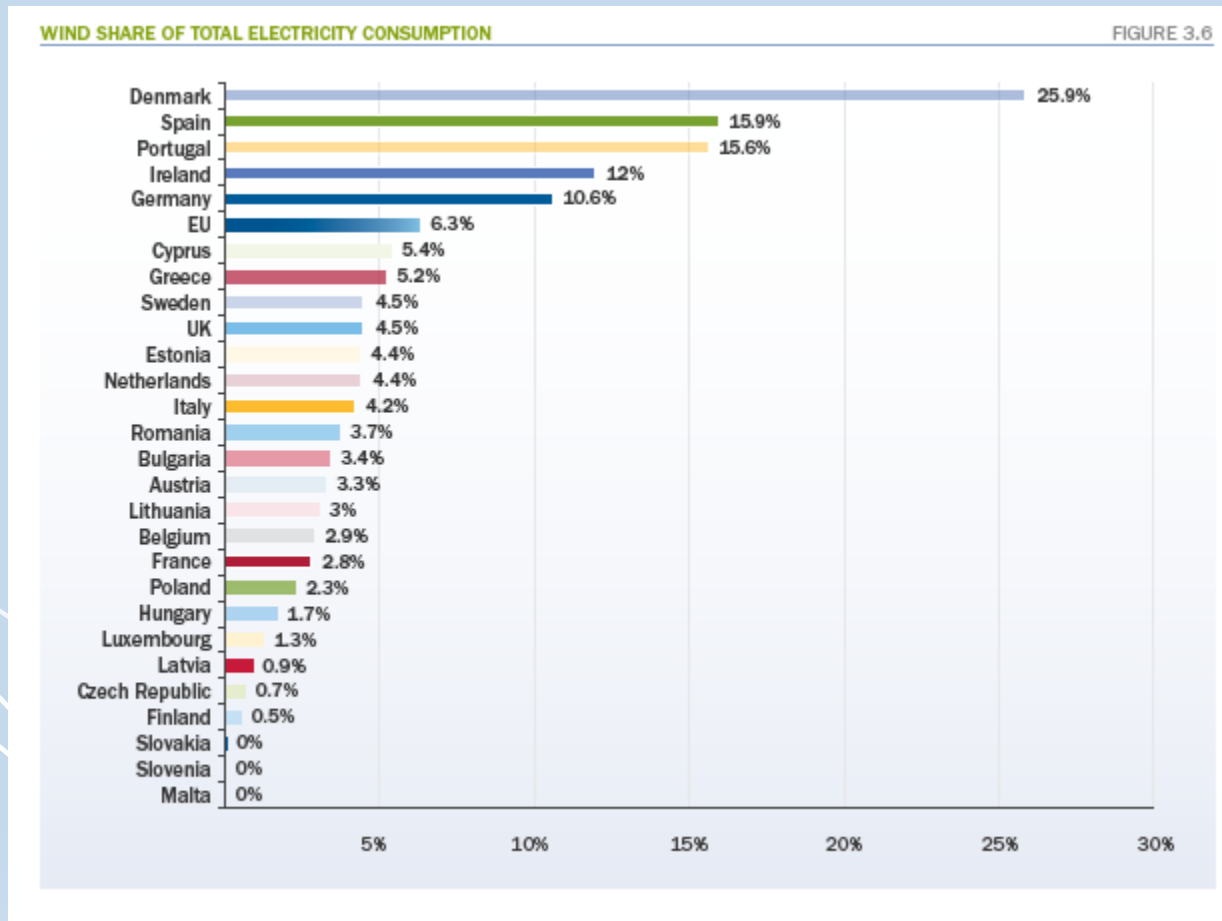
# Ripartizione nel mondo della potenza eolica alla fine del 2011

Ripartizione della potenza eolica nel mondo a fine 2011\*



\*Stima. Fonte: EurObserv'ER 2012

# Contributo eolico nella produzione di energia elettrica in Europa



# Potenza eolica nei paesi dell'Unione Europea 2010- 2011 (MW)

	2010	2011*	Potenza installata nel 2011	Potenza dismessa nel 2011
Germania	27 191,0	29 075,0	2 007,0	123,0
Spagna	20 759,0	21 673,0	914,0	
Italia	5 814,3	6 737,0	932,7	10,0
Francia**	6 080,0	6 684,0	604,0	
Regno Unito	5 378,0	6 540,0	1 162,0	
Portogallo	3 865,0	4 291,0	426,0	
Danimarca	3 802,0	3 927,0	180,9	55,9
Svezia	2 019,0	2 907,0	906,0	18,0
Paesi Bassi	2 237,0	2 316,3	93,2	13,9
Irlanda	1 428,0	1 631,0	203,0	
Grecia	1 320,4	1 626,5	311,2	5,1
Polonia	1 185,0	1 616,0	431,0	
Austria	1 013,5	1 084,0	73,8	3,3
Belgio	912,0	1 078,0	166,0	
Romania	462,0	982,0	520,0	
Bulgaria	375,0	612,0	237,0	
Ungheria	293,0	329,0	36,0	
Repubblica Ceca	215,0	217,0	2,0	
Finlandia	188,0	197,0	9,0	
Estonia	108,0	183,9	75,9	
Lituania	154,0	179,0	25,0	
Cipro	82,0	134,0	52,0	
Lussemburgo	43,3	43,3	0,0	
Lettonia	31,0	31,0	0,0	
Slovacchia	3,1	3,1	0,0	
Slovenia	0,0	0,0	0,0	
Malta	0,0	0,0	0,0	
<b>Totale UE 27</b>	<b>84 958,6</b>	<b>94 097,7</b>	<b>9 367,7</b>	<b>229,2</b>

\*I dati 2011 sono stimati dai ministeri, gestori di rete, agenzie nazionali per l'energia e associazioni nazionali per l'eolico. \*\*Dipartimenti d'Oltremare inclusi per la Francia. Fonte: EurObserv'ER 2012

# Scelta del sito

Una località idonea per l'installazione di generatori eolici deve soddisfare innanzitutto i seguenti requisiti meteorologici:

- valore elevato della velocità media del vento (su base annua);
- minima turbolenza dell'aria;
- direzione del vento pressoché costante nel corso dell'anno.

Altri criteri e problemi da tenere presente nell'ubicazione di una centrale eolica sono:

- *Impegno del territorio;*
- *Rumore;*
- *Interferenze elettromagnetiche;*
- *Interferenze con flora e fauna, impatto visivo;*
- *Possibilità di trasporto dell'energia elettrica prodotta e sua integrazione con la rete elettrica.*

# Velocità del vento

Il contenuto energetico di una massa d'aria aumenta con la terza potenza della sua velocità media.

Una deviazione del 10% della velocità attesa corrisponde ad una deviazione del 30% sulla potenza derivabile

Le misure di velocità del vento vengono in genere effettuate per mezzo di sensori in grado di inviare segnali analogico-digitali, proporzionali alla velocità ed alla direzione della corrente d'aria da cui vengono investiti. Tali valori, mediati su un periodo di dieci minuti, sono registrati su cassette magnetiche; l'apparato, alimentato per mezzo di batterie, può rimanere in funzione ininterrottamente per circa 30 giorni



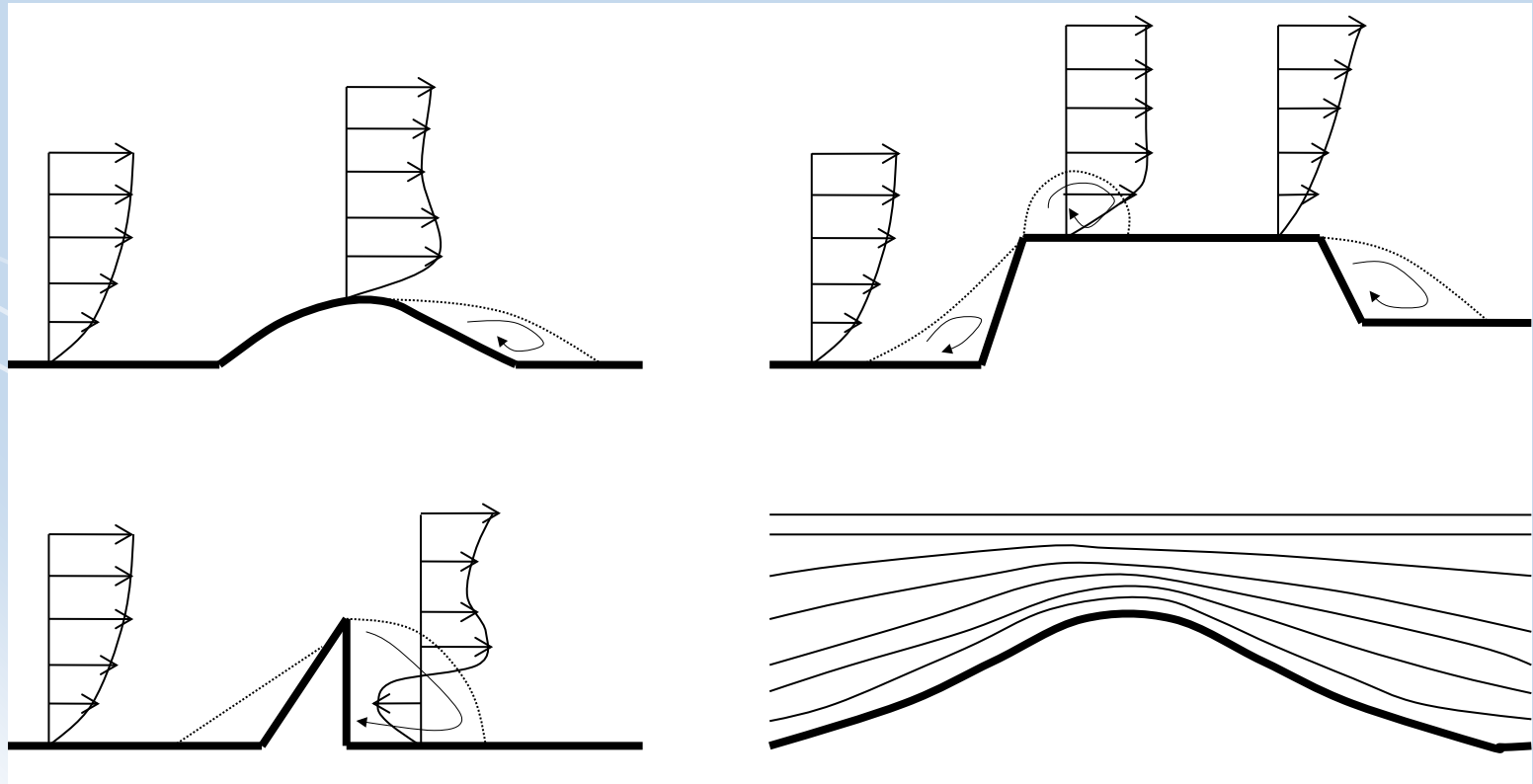
**Per estrapolare i dati relativi alla velocità del vento ad una certa quota si può utilizzare la formula dovuta a Hellmann**

$$V(H_2) = V(H_1) \left( H_2 / H_1 \right)^\alpha$$

- $H_1$  è la quota alla quale è stata effettuata la misura;
- $H_2$  è la quota alla quale si vuole conoscere la velocità del vento;
- $V(H_1)$  è la velocità del vento alla quota  $H_1$ ;
- $V(H_2)$  è la velocità del vento alla quota  $H_2$ ;
- $\alpha$  è un esponente caratteristico della località in esame.

# Stima della velocità del vento

La valutazione dell'energia eolica potenzialmente sfruttabile è una operazione molto difficile e complessa, in quanto la produzione di un impianto eolico dipende fortemente dalle caratteristiche anemologiche dal luogo in cui esso viene installato; a loro volta queste caratteristiche, in un dato sito ed alle quote di interesse di un aeromotore, sono influenzate in modo sensibile dalla orografia locale.



# Misure di velocità

Sensori in grado di inviare segnali analogico-digitali proporzionali alla velocità ed alla direzione della corrente d'aria da cui vengono investiti.

- I valori, mediati su un periodo di dieci minuti, sono registrati
- l'apparato, alimentato per mezzo di batterie, può rimanere in funzione ininterrottamente per circa 30 giorni.

La velocità di rotazione del mulinello e la direzione sono trasformati in segnali elettrici e inviati in remoto al sistema di acquisizione ed elaborazione dati all'interno della stazione meteo, dove sono convertiti in forma digitale e presentati su indicatori.

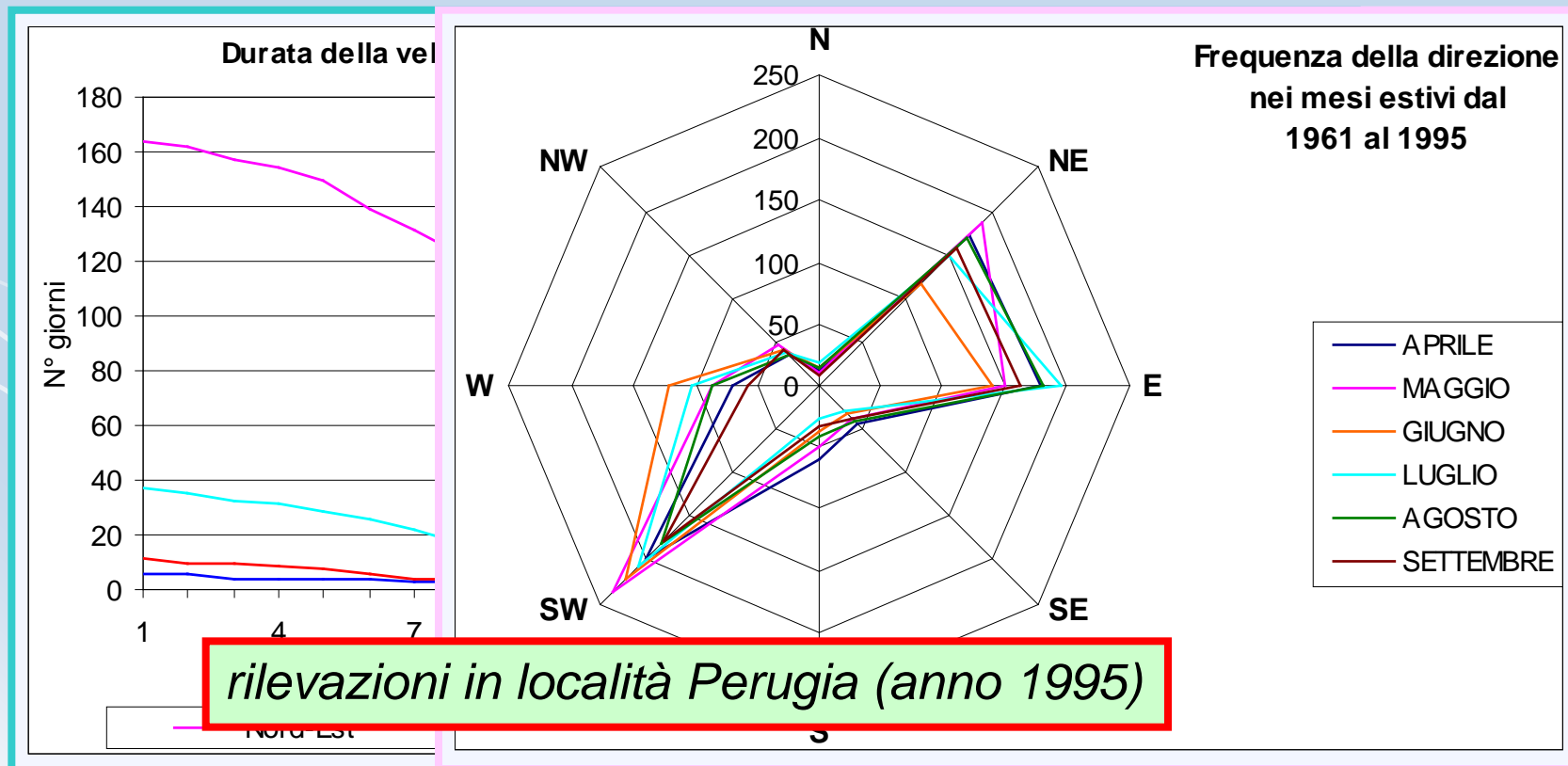
## Classificazione del vento in base alla sua velocità:

- ✓ *vento teso*: le oscillazioni di velocità sono piccole;
- ✓ *vento a raffiche*: la velocità ha una variazione in aumento di almeno 10 nodi, per una durata inferiore a 20 secondi, con direzione quasi costante rispetto al valore delle medie;
- ✓ *vento turbinoso*: la velocità cambia in continuazione direzione ed modulo.

# Presentazione ed elaborazione dei dati di vento









**Grafico della  
velocità del  
direzione di p**

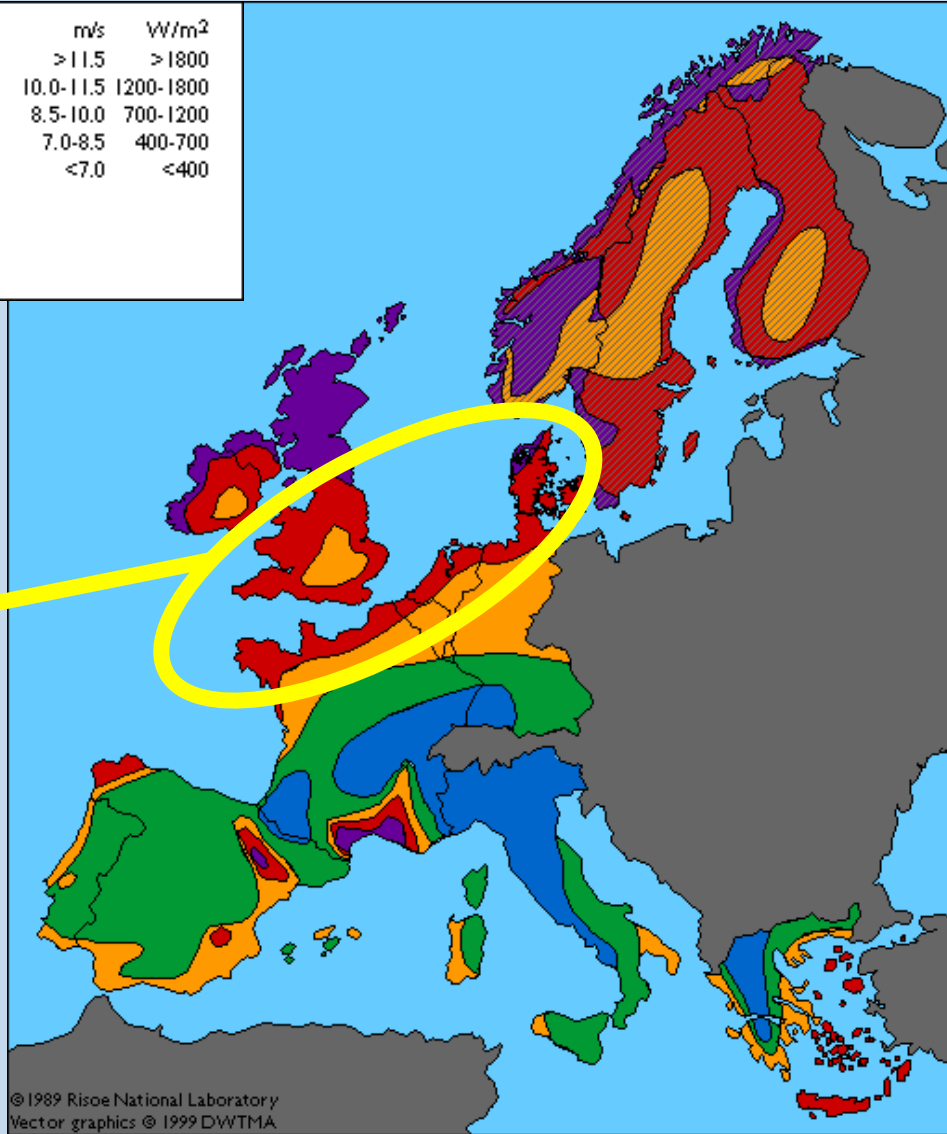
**Frequenza della direzione  
del vento rilevata nei mesi  
estivi**





# Mappa delle risorse eoliche in Europa

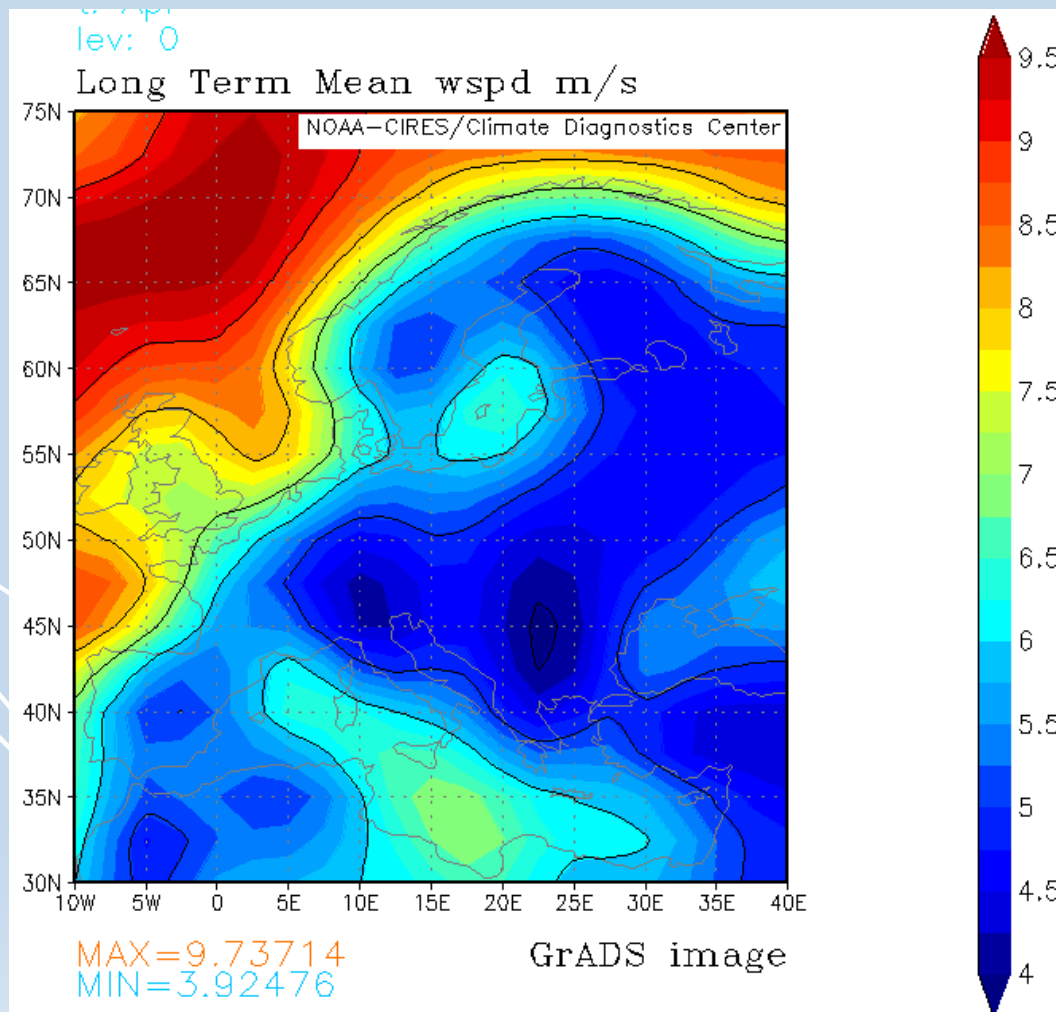
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							



Zone in Europa di maggior sfruttamento dell'energia eolica

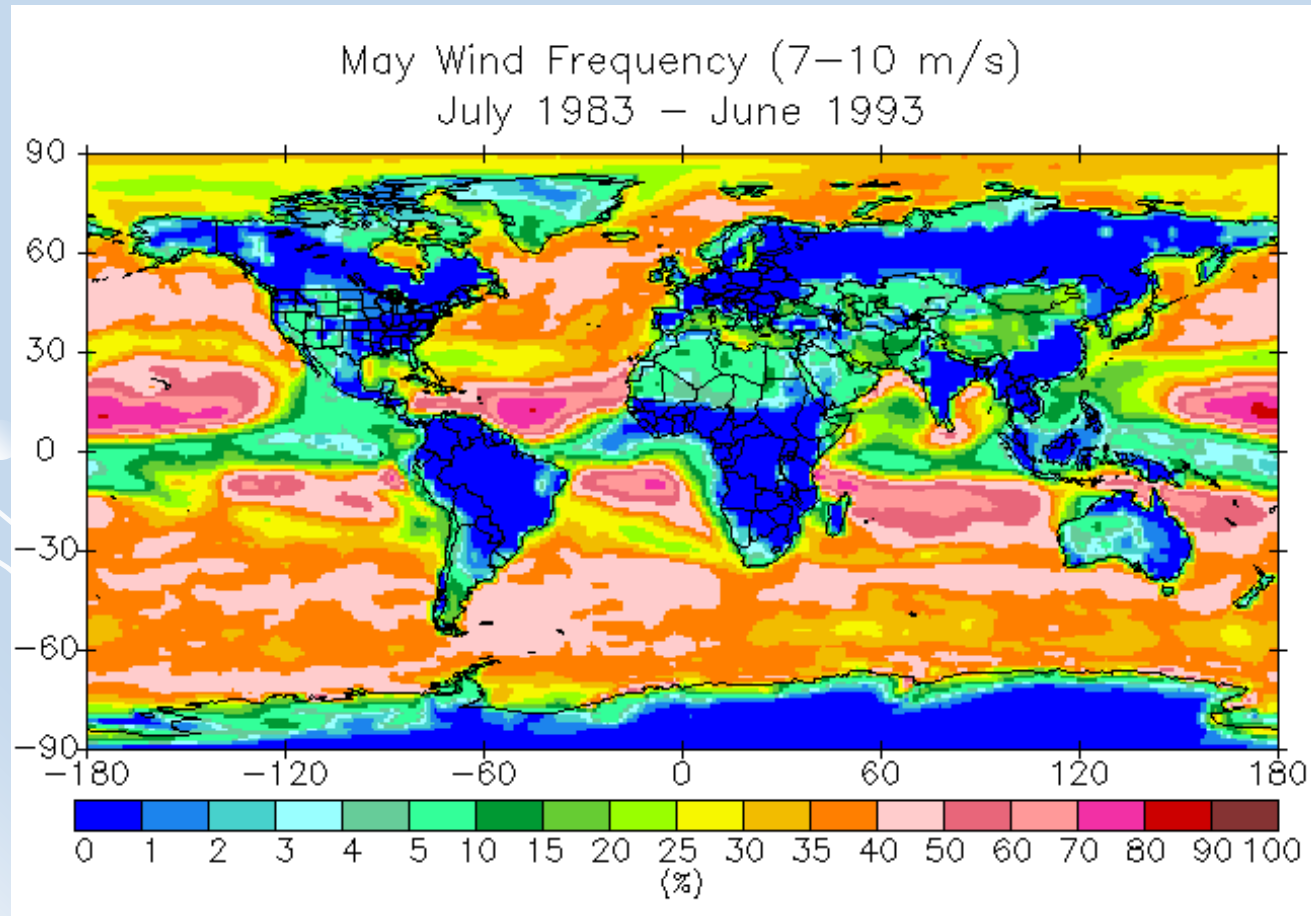
# Mappa delle risorse eoliche in Europa

Velocità media mensile del vento nel mese di Aprile



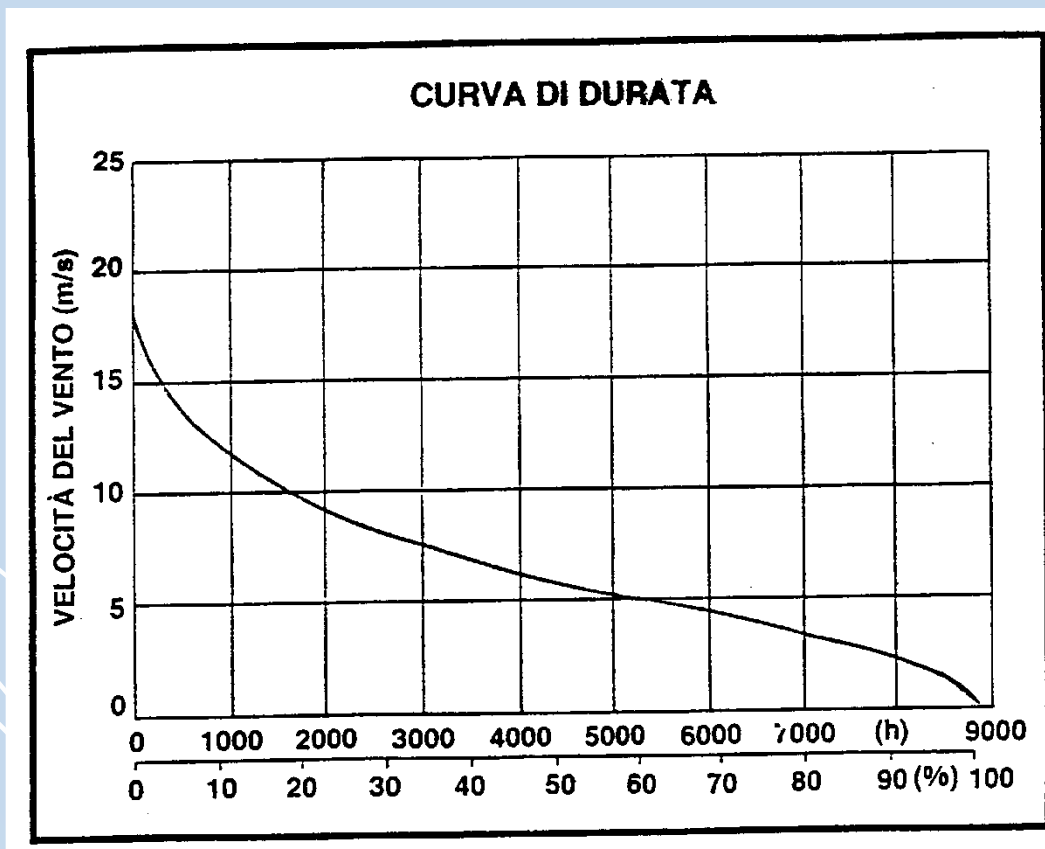
# *Mappa delle risorse eoliche nel mondo*

Frequenza mensile della velocità del vento rilevata nell'intervallo 7-10 m/sec. (mese di gennaio)

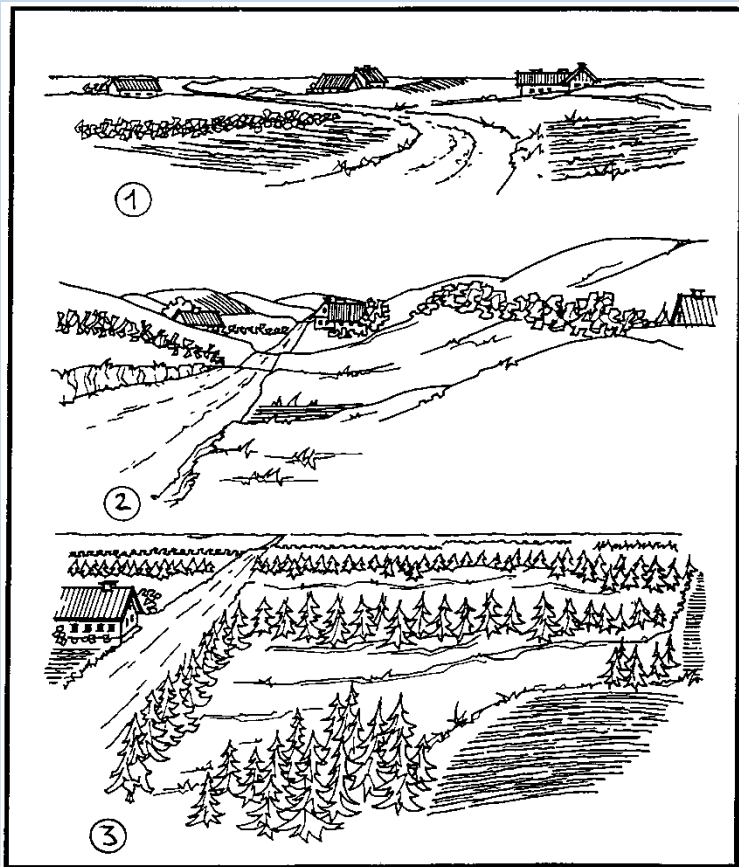


# Curve di durata della velocità vento

Permettono di individuare, in termini di ore/anno, il numero delle ore in cui una certa velocità viene ecceduta



# Classi di scabrezza secondo il metodo dell' Atlante del vento



Classe di scabrezza	Tipo di paesaggio	Energia relativa (%)
0	Distese d'acqua	100
1	Aree con scarsa vegetazione e senza edifici	70
2	Aree rurali con edifici e vegetazione sparsi	50
3	Foreste, zone abitate, zone rurali con vegetazione densa	30

Il Danish Technological Institute ha messo a punto un metodo, detto dell' Atlante del Vento, che consente di tenere in conto le caratteristiche morfologiche del paesaggio, ai fini dello sfruttamento dell'energia eolica. Gli ostacoli presenti in una certa zona hanno l'effetto di "spezzare" il vento; solamente ad una certa distanza da essi la corrente d'aria torna ad essere indisturbata e riacquista la sua potenza. ciascun tipo di paesaggio può essere classificato secondo quattro classi di "scabrezza", da 0 a 3

# I generatori eolici

- aerogeneratori ad asse orizzontale: l'asse di rotazione è parallelo alla superficie del terreno;

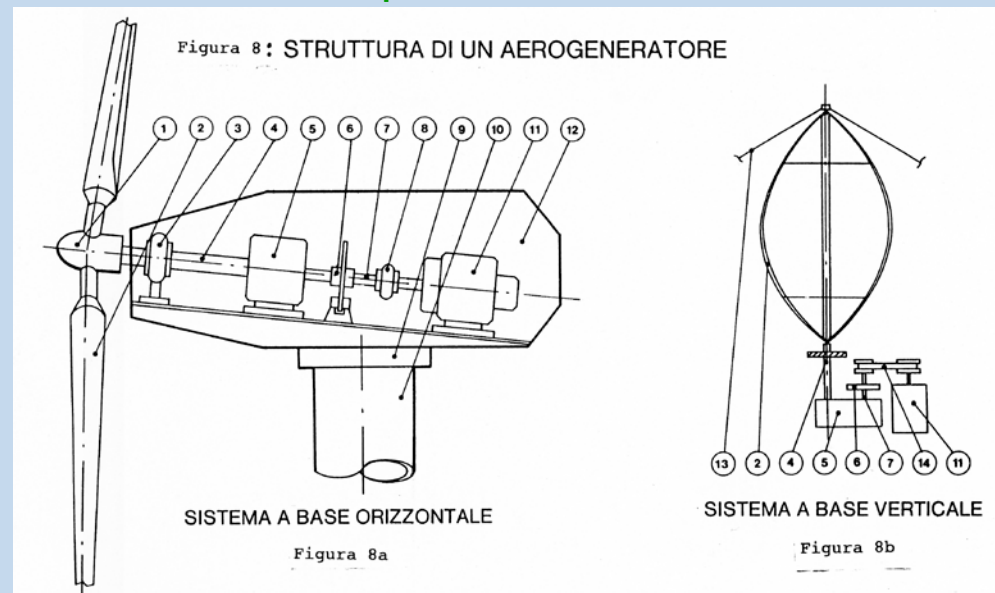
Legenda:

- 1) mozzo
- 2) pala-rotore
- 3) supporto albero
- 4) albero lento
- 5) moltiplicatore di giri
- 6) freno
- 7) albero veloce
- 8) giunto
- 9) supporto-cuscinetto per l'orientamento secondo la direzione del vento
- 10) torre di sostegno
- 11) generatore
- 12) navicella
- 13) tirante
- 14) cinghia di trasmissione

aerogeneratori ad asse verticale: l'asse di rotazione è perpendicolare alla direzione del vento.

La manutenzione degli aerogeneratori può essere effettuata in base alla potenza, ed in particolare:

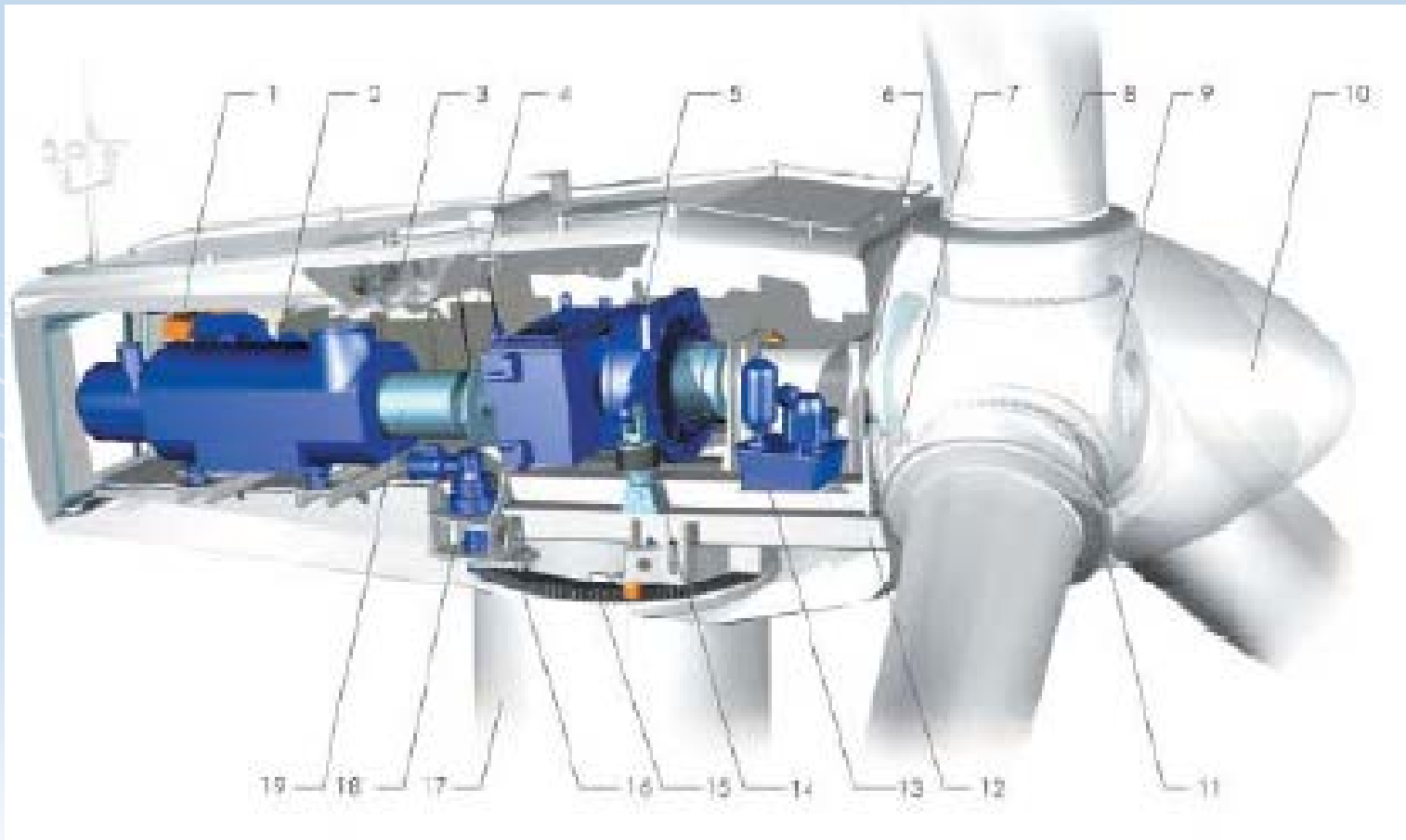
- per generatori a 100 kW e diametri del rotore fino a 15 m);
- per generatori a 1000 kW e diametri del rotore compresi tra 15 e 25 m);
- per generatori a 1000 kW e fino a qualche MW e diametri del rotore fino a 30 m).



# I generatori eolici

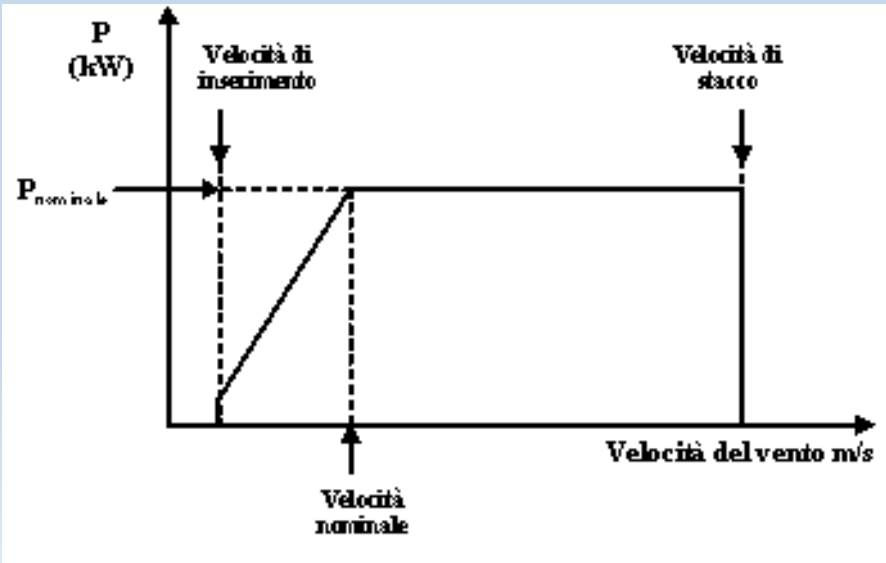
## Schema di un aerogeneratore

1. Argano di servizio, 2. Generatore, 3. Sistema di raffreddamento, 4. Quadro di controllo, 5. Moltiplicatore di giri, 6. Albero lento, 7. Sistema di bloccaggio rotore, 8. Pala, 9. Mozzo, 10. Ogiva, 11. Cuscinetto pala, 12. Telaio navicella, 13. Centralina idraulica, 14. Braccio di reazione moltiplicatore, 15. Anello di imbardata, 16. Freno, 17. Torre, 18. Motoriduttore di imbardata, 19. Giunto di accoppiamento idraulico)

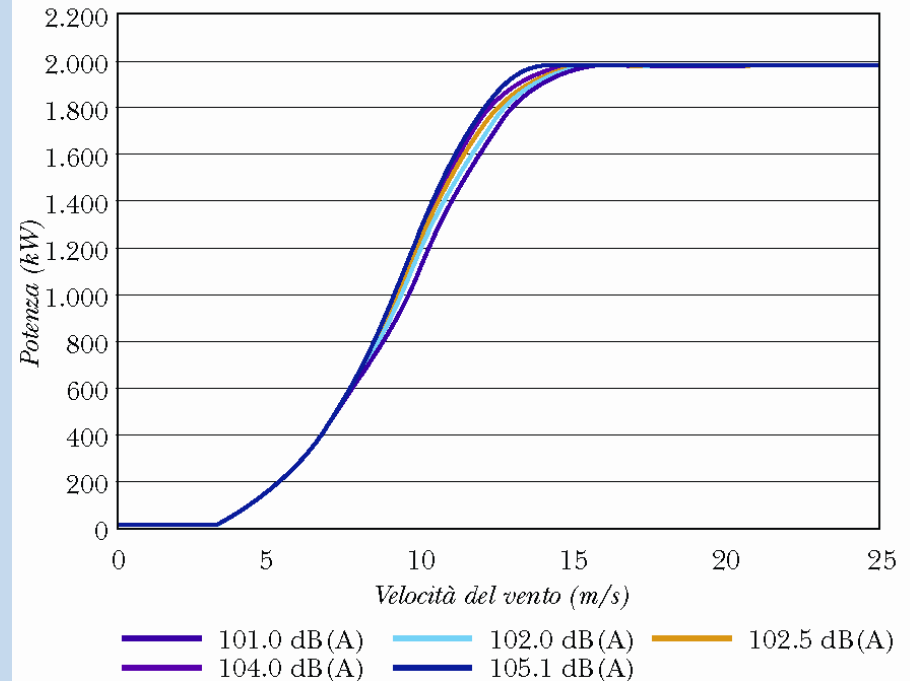


# Curva di potenza tipica di un aerogeneratore

# Curva di potenza aerogeneratore da 2 MW



### Curve di potenza turbina V80-2.0 MW

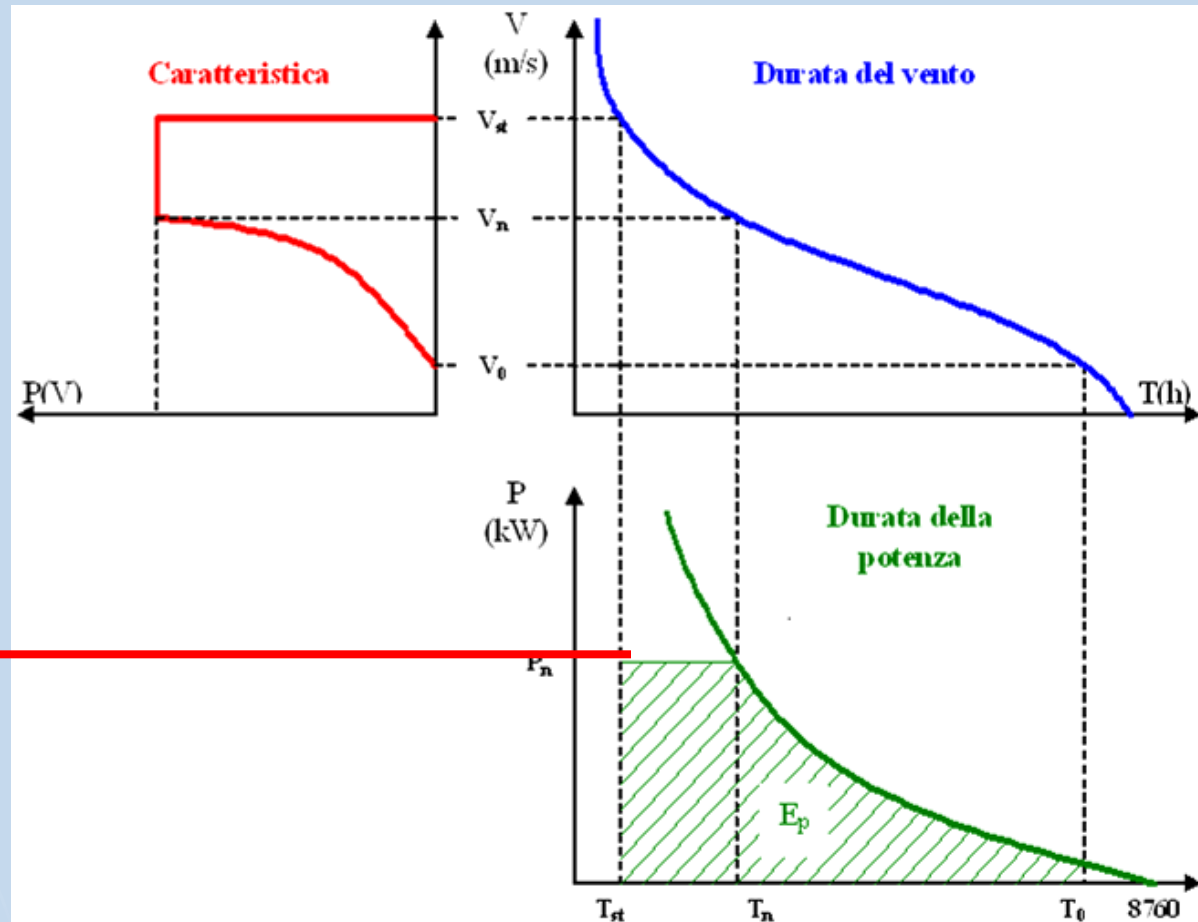




# Energia prodotta nel corso di un anno

Combinando la curva caratteristica di potenza di un aerogeneratore con la curva di durata della velocità del vento di un determinato sito è possibile determinare la curva di durata della potenza resa;

l'energia prodotta nel corso di un anno è rappresentata dall'area sottesa da detta curva



Potenza massima estraibile

$$P_{\max} = 0,593 \cdot P$$

# Potenziale eolico

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

La potenza estraibile dal vento può essere pertanto espressa come

$$P = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

- Cp - coefficiente di potenza - è definito come il rapporto tra la potenza resa e quella contenuta nella vena fluida indisturbata di sezione A a monte della macchina.
- Cp assume valori differenti a seconda della configurazione e del tipo di rotore, ma non supera in genere il 75% del valore ideale di 0.593 determinato da Betz.

Esplicitando la precedente in funzione del diametro del rotore, si ottiene:

$$P = H \cdot C_p \cdot \rho \cdot D^2 \cdot V^3$$

# Potenziale eolico

Il fattore di capacità è il rapporto tra l'energia effettivamente prodotta e quella che sarebbe prodotta in un anno se l'aerogeneratore operasse per tutto il tempo alla sua potenza nominale:

$$C_f = \frac{\text{energia netta fonita dall' aerogeneratore}}{8760P}$$

- P è la potenza nominale della macchina (kW);
- 8760 sono le ore in un anno.

Il numeratore della precedente può essere esplicitato:  $\longrightarrow$

$$\text{energia netta} = K_1 K_2 \int_{V_{in}}^{V_{out}} f(V)p(V)dV$$

- ✓ V è la velocità del vento (m/s);
- ✓ f(V) è la densità di probabilità della velocità del vento (in un anno);
- ✓ f(V)dV è la frazione di tempo nell'ambito di un anno in cui la velocità vale V (ore);
- ✓ p(V) è la curva caratteristica di potenza della macchina misurata all'uscita del generatore elettrico;
- ✓ K1 è la disponibilità operativa, ossia un fattore di riduzione dell'energia prodotta dalla macchina a causa di periodi di arresto per guasti e/o manutenzione;
- ✓ K2 è un fattore di riduzione dell'energia prodotta dalla macchina a causa delle interazioni con ostacoli e/o con le altre macchine presenti.

# Aerogeneratore di piccola taglia



**15 Kw**  
**alla velocità di 12 m/s**

# *Aerogeneratore di media taglia*

**850 KW  
alla velocità di 14 m/s**



# Aerogeneratore di grande taglia



**2000 KW**  
**alla velocità di 13 m/s**

# Linee della ricerca tecnologica e scientifica nel prossimo decennio

- *Studio approfondito dei fenomeni di fatica;*
- *Sperimentazioni in condizioni meteorologiche avverse;*
- *Sviluppo di nuove tecnologie per lo sfruttamento dell'energia eolica su piattaforme marine (Off-shore);*
- *Desalinizzazione dell'acqua marina;*
- *Ricerca della taglia ottimale degli aerogeneratori eolici.*

# Sperimentazioni in condizioni meteorologiche avverse

Recenti applicazioni dedicate a turbine che lavorano in condizioni di temperatura estremamente bassa sono costituite da anemometri riscaldati e pale riscaldate, e sono in fase di sperimentazione dispositivi di riscaldamento per i sistemi di sicurezza e per gli alberi rotanti

- La formazione di ghiaccio sulle pale e sui sensori meteorologici.

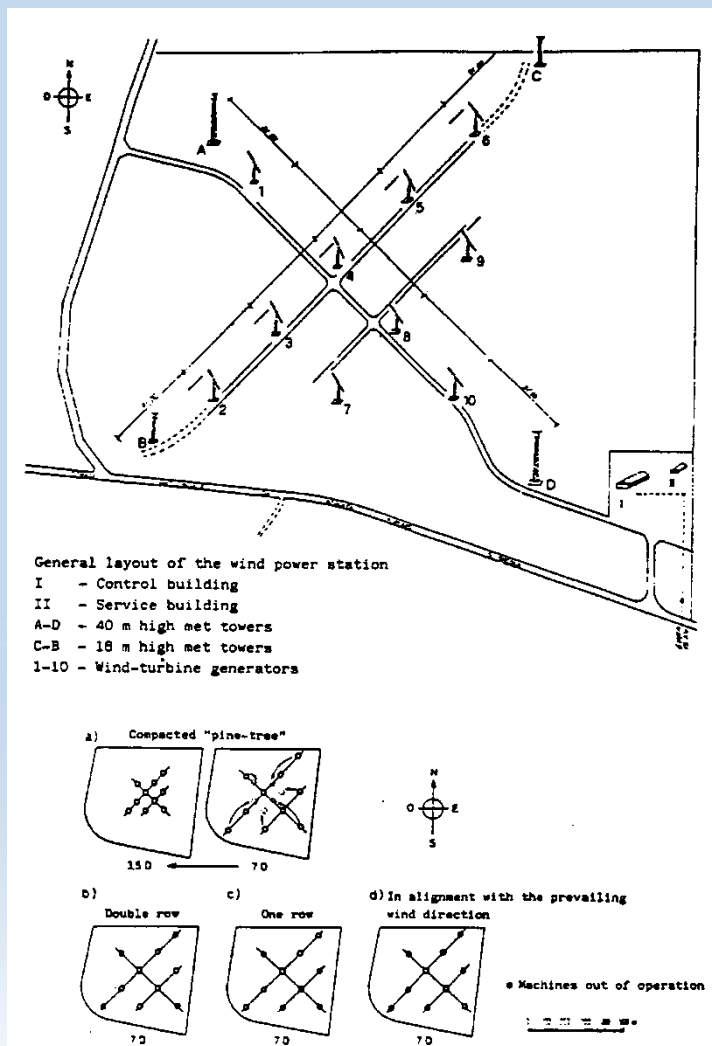


# La situazione Italiana

- Dal punto di vista anemologico, l'Italia è tutt'altro che sfavorita:

Località	Velocità media annua
Capo Sandalo (CA)	7.4
Frosolone (IS)	6.7
Aritzo (NU)	6.5
S. Demetrio (CS)	6.0
Foggia (FG)	6.0
Pradarena (RE)	5.6
Monte Arci (OR)	5.7
Santa Gilla (CA)	5.6
S. Antioco (CA)	5.6
Le Porte (GR)	5.6

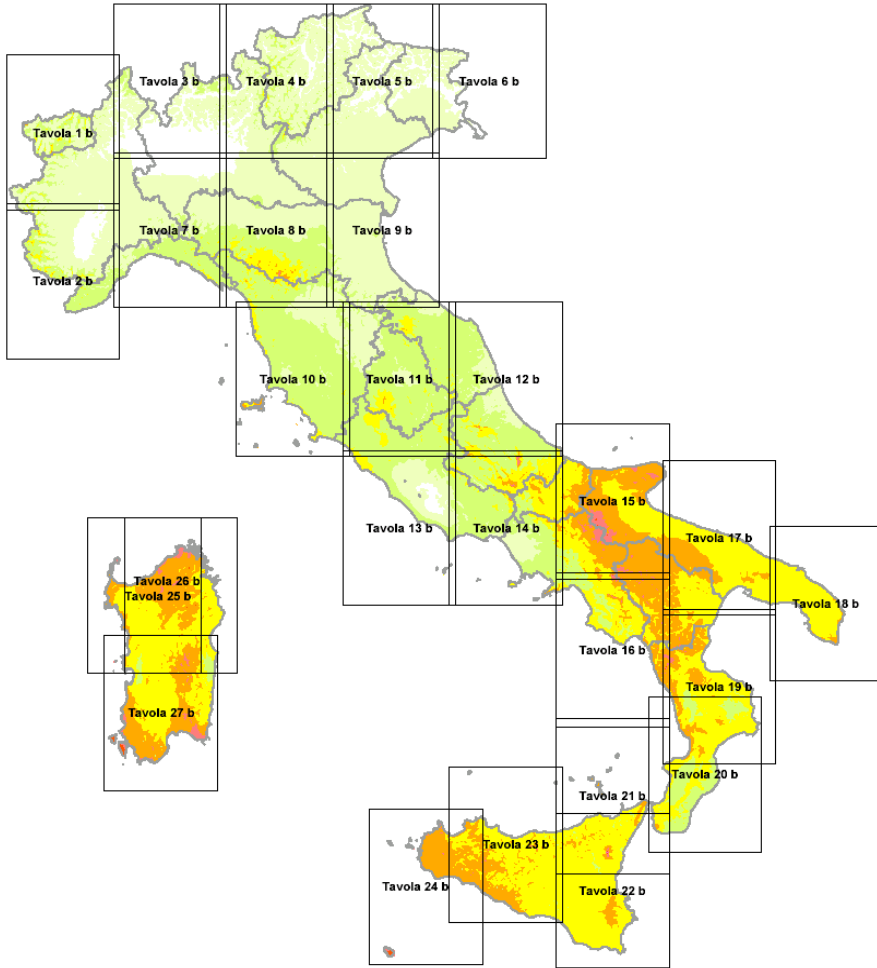
# La situazione Italiana



Oltre alla campagna di misura, l'Enel sta portando avanti un programma di sperimentazione di aerogeneratori di piccola, media e grossa taglia e di studi di fattibilità di centrali eoliche da collegare alla rete. Per quanto riguarda le centrali eoliche da collegare alla rete, nel 1984 l'Enel ha costruito in Alta Nurra, in Sardegna, una centrale sperimentale da 500 KW, costituita da 10 generatori da 50 KW ciascuno; cinque anni di esercizio hanno consentito di acquisire esperienze significative nella conduzione di centrali eoliche e nello studio dei problemi di interazione delle macchine, tra di loro e con l'ambiente circostante

**Disposizione planimetrica della centrale eolica di Alta Nurra in Sardegna**

# *Quadro generale di sintesi della velocità media annua del vento a 50 m dal suolo in Italia*



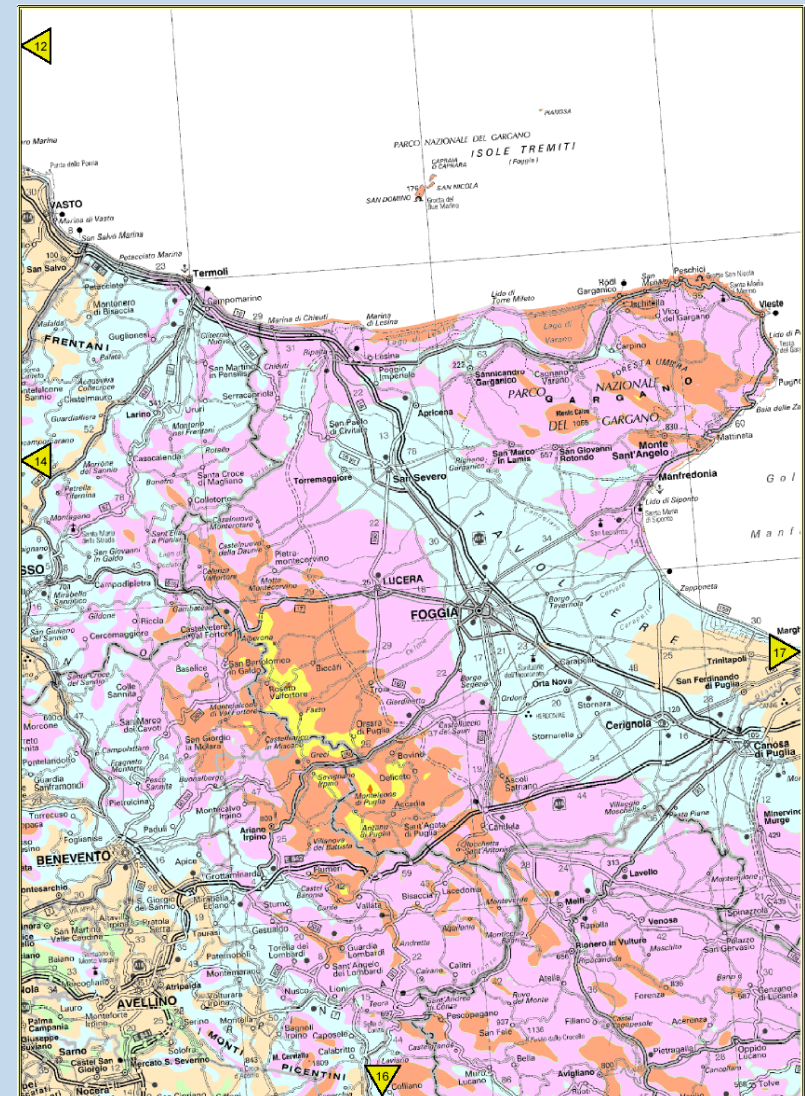
Mapa elaborata da CESI in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova nell'ambito della Ricerca di Sistema. Per una corretta interpretazione si veda il testo dell'Atlante di cui questa mappa fa parte.

m/s  
3 4 5 6 7 8 9 10 11

Scala 1:6.000.000

# Mappa della producibilità specifica

**Esempio di mappa della  
producibilità specifica a  
50 m dal suolo  
(numero di ore annue  
equivalenti di  
funzionamento alla  
potenza nominale di un  
aerogeneratore di media  
taglia con mozzo a 50 m  
dal suolo)**



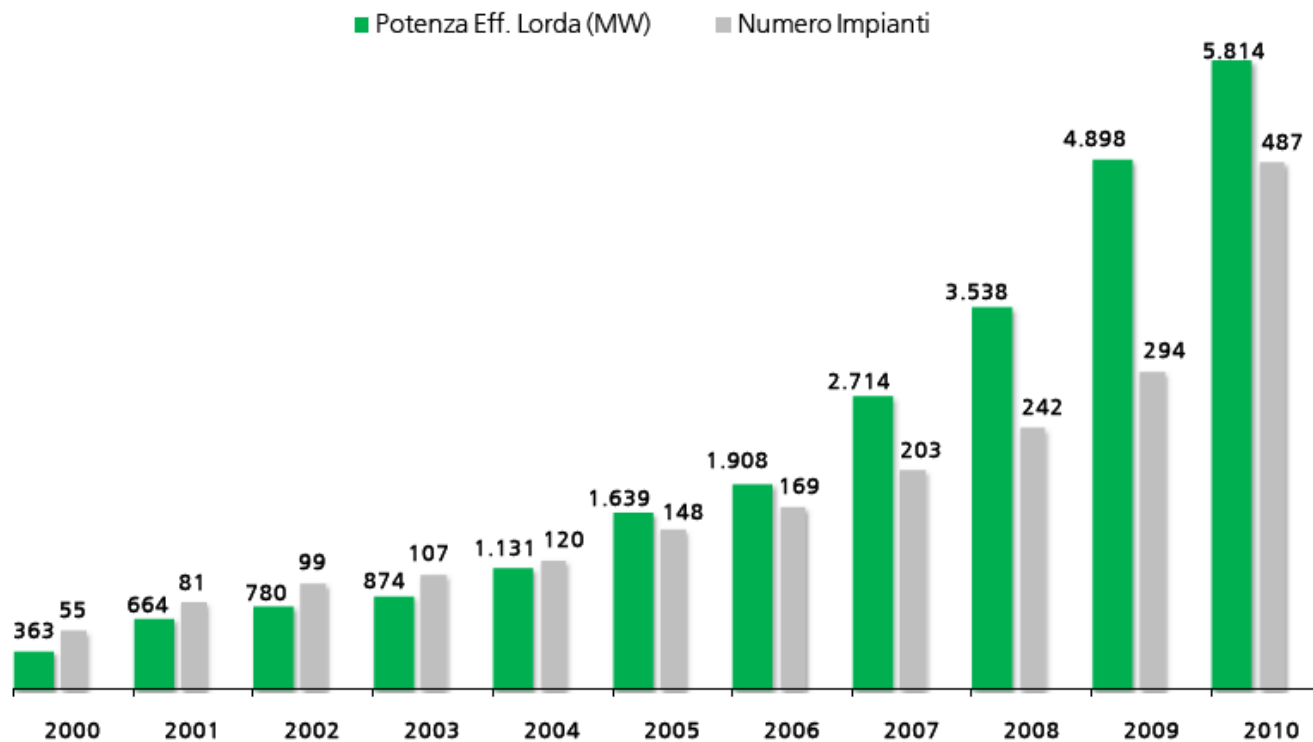
MWh / MW  
500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000

0 20 40  
KMT

Mapa elaborata da CESI in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Genova nell'ambito della Ricerca di Sistema. Per una corretta interpretazione si veda il testo dell'Atlante di cui questa mappa fa parte.

Cartografia di base: copyright GEONEX - DE AGOSTINI 2002 - Tutti i diritti riservati  
www.geonext.it - info@geonext.it

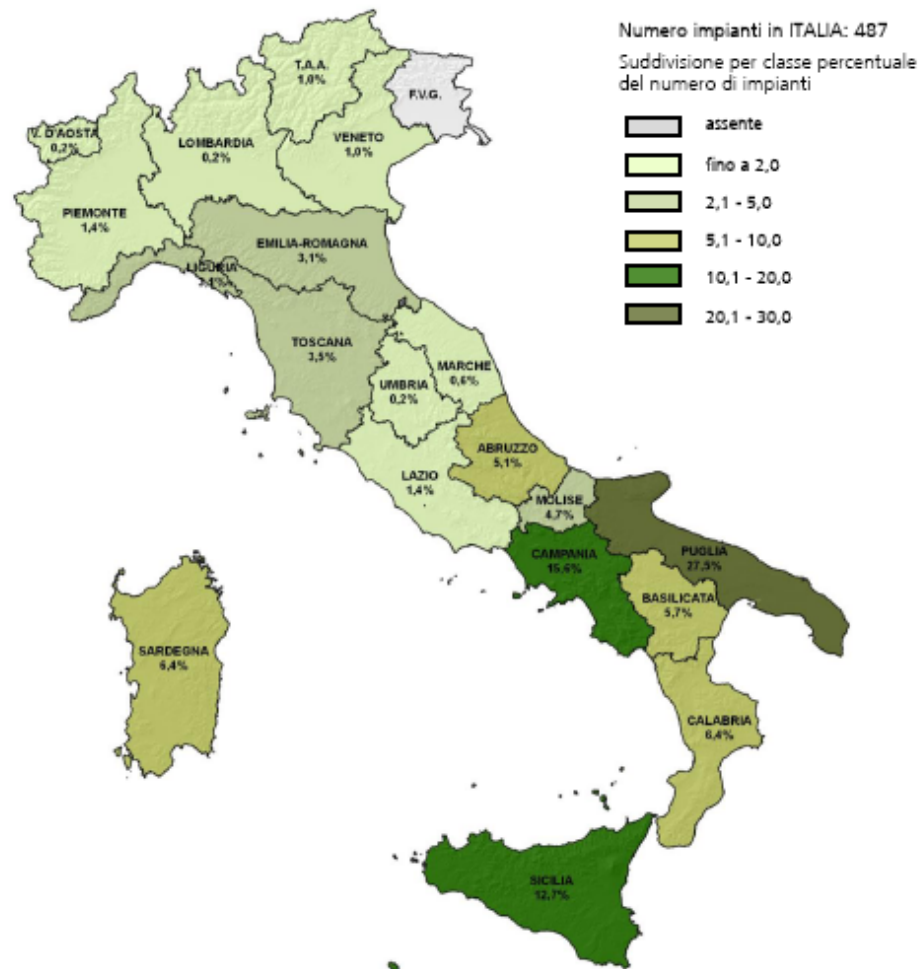
## Evoluzione della numerosità e della potenza degli impianti eolici in Italia



Fonte: GSE

# Impianti eolici in Italia per Regioni

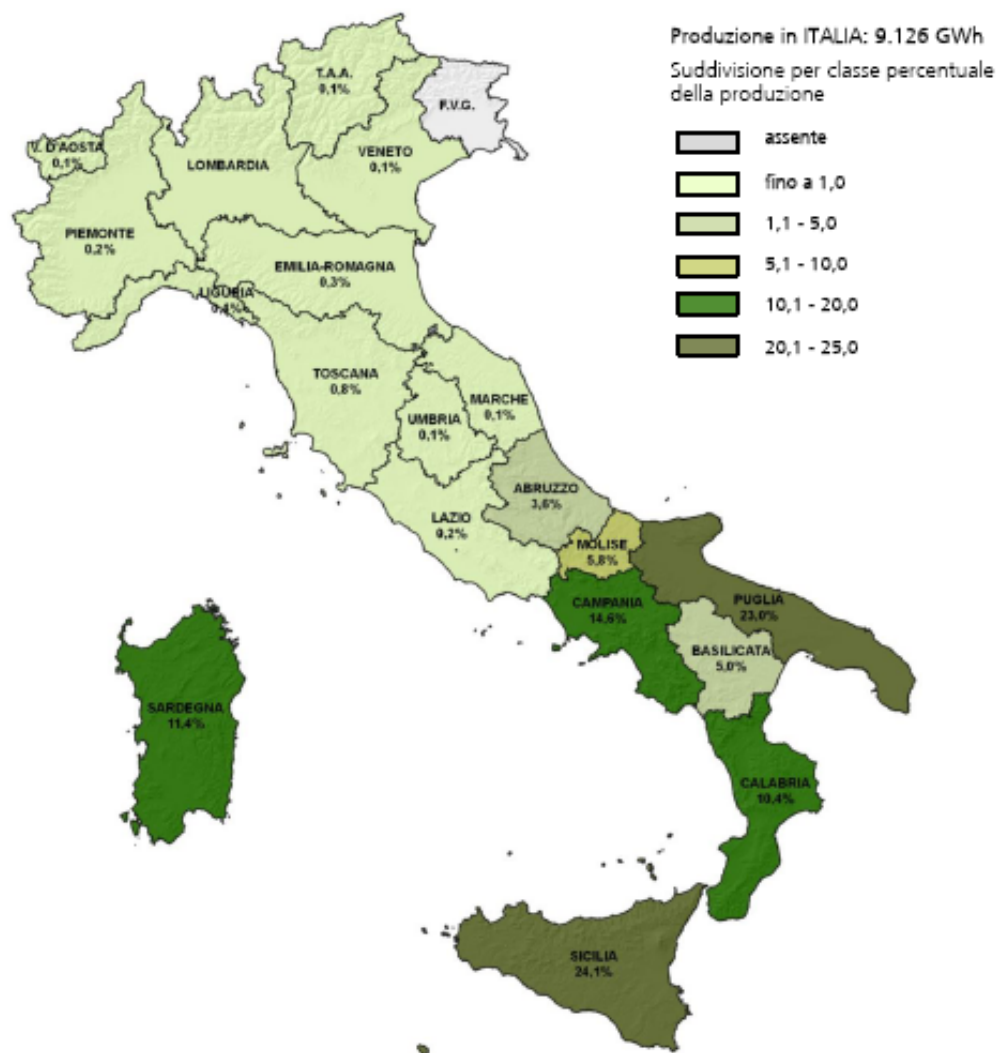
Distribuzione regionale numero impianti eolici a fine 2010



Fonte: GSE

# Potenza eolica installata in Italia per Regioni

Distribuzione regionale della produzione eolica nel 2010



Fonte: GSE

## Potenza eolica installata in Italia (MW)

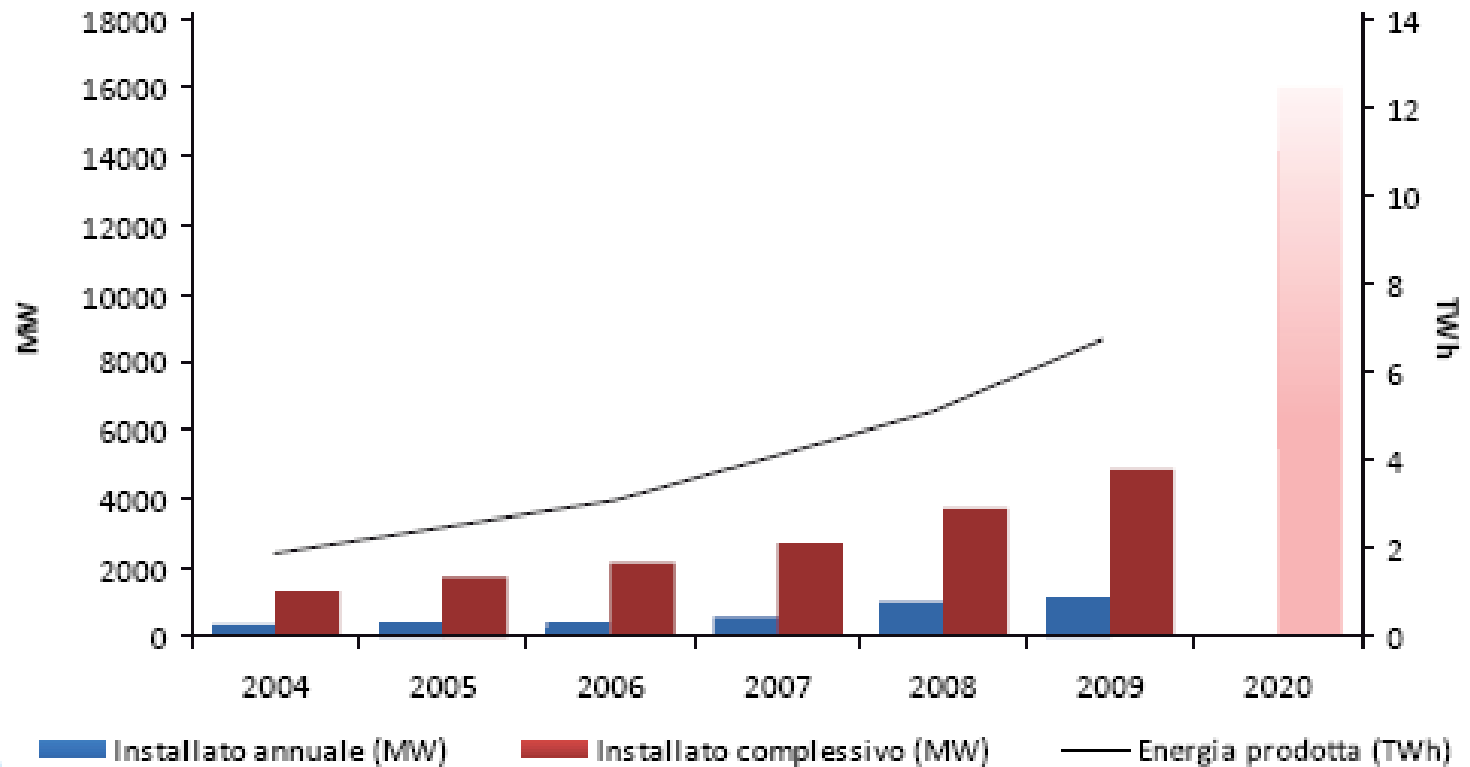
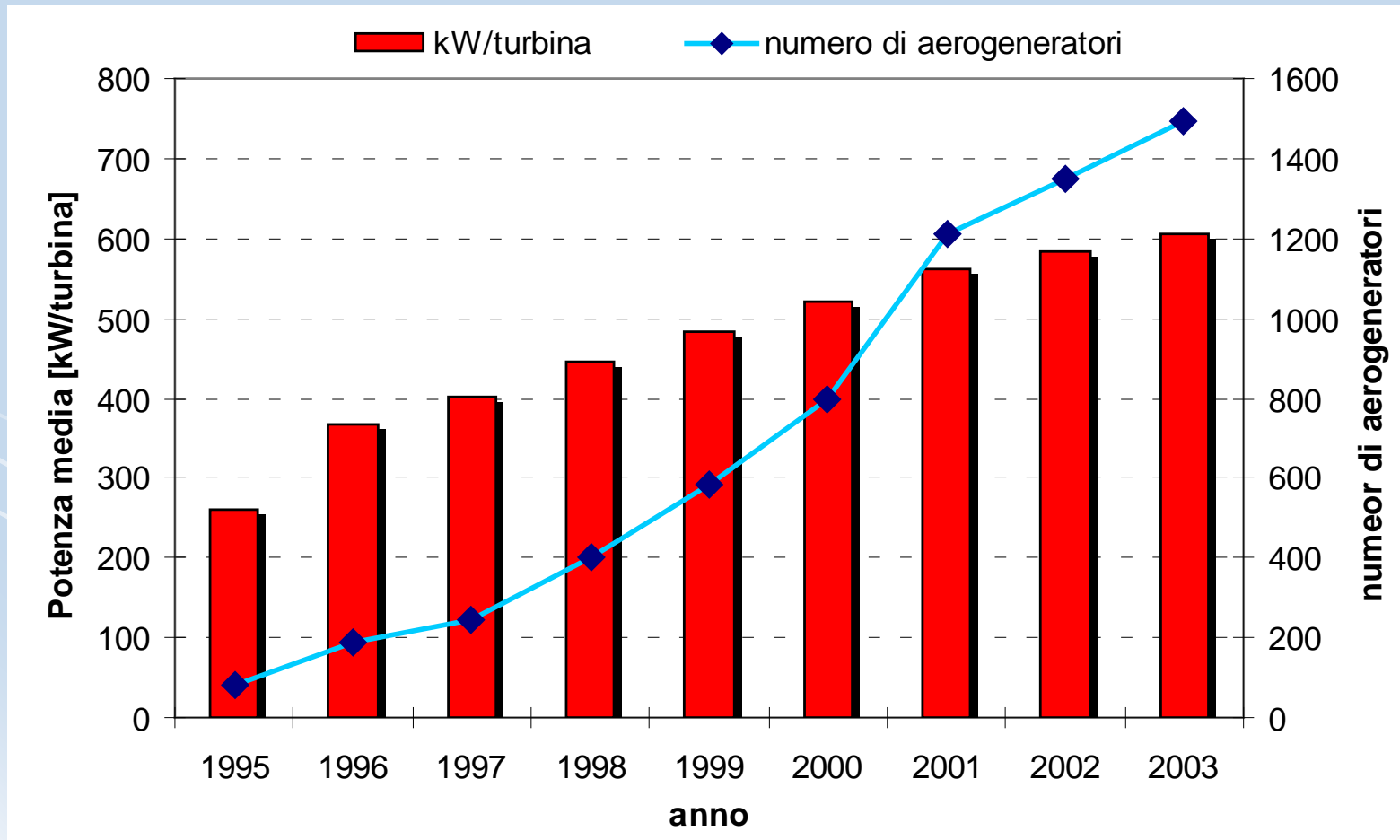


Figura 1 Elaborazioni APER su dati ENEA



# Potenza media per aerogeneratore installato in Italia tra il 1995 e il 2003



# Potenza media unitaria delle turbine eoliche installate in Italia 2004-2009

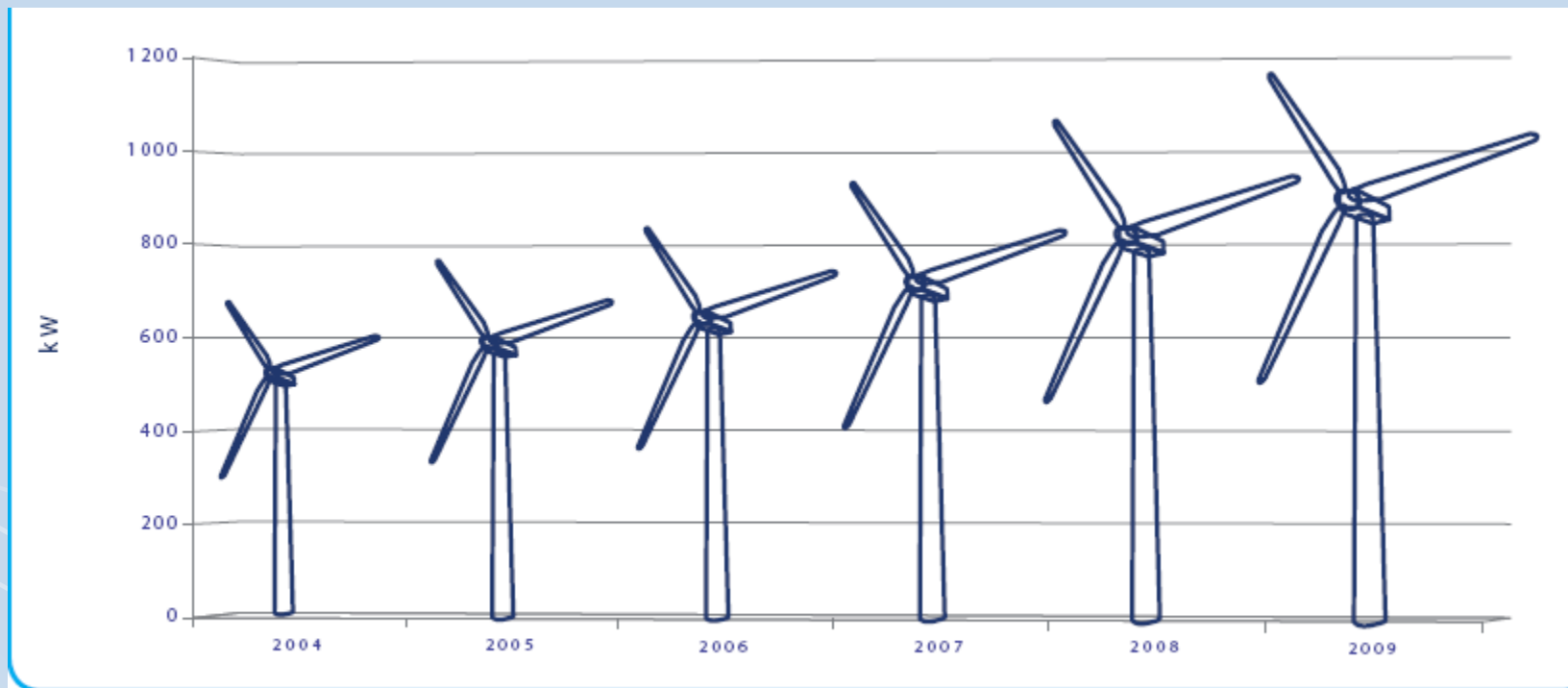


Figura 5 Elaborazioni APER su dati ENEA

# Ubicazione ed impatto ambientale

Aerogeneratori:

- numero elevato;
- disposti secondo schemi ed interdistanze opportuni.

**N.B.**

La superficie effettivamente occupata dalle strutture di una centrale eolica comprese le opere di supporto (cabine elettriche e strade) corrisponde a solo l'2-3% del terreno impiegato.



**Aerogeneratori ed infrastrutture stradali in Germania**

# Ubicazione ed impatto ambientale

Rumore

Interferenze elettromagnetiche

Impatto visivo

Effetti su flora e fauna

Emissioni indirette

- La tecnologia attuale consente di ottenere, nei pressi di una centrale eolica, livelli di rumore alquanto contenuti, tali da non modificare il rumore di fondo, che, a sua volta, è influenzato dal vento stesso.
- Il rumore generato può essere smorzato migliorando l'inclinazione delle pale, la loro conformazione, la struttura e l'isolamento acustico della navicella.
- Il rumore proveniente da un aerogeneratore deve essere inferiore ai 45 decibel in prossimità delle vicine abitazioni. Un tipico aerogeneratore da 300 kW, funzionante con il vento di 8 m/s, produce, alla distanza di 200 m, un livello di pressione sonora di circa 45 dB. Tale valore corrisponde ad una conversazione a bassa voce.
- I moderni aerogeneratori soddisfano questa richiesta a partire da distanze di 150/180 metri.

# Ubicazione ed impatto ambientale

Rumore

Interferenze elettromagnetiche

Impatto visivo

Effetti su flora e fauna

Emissioni indirette

- L'origine di disturbi elettromagnetici dovuti alla presenza di aerogeneratori è da ricercare nella interferenza delle pale (specialmente se in materiali metallici o riflettenti o se dotate di strutture metalliche all'interno) e dei sostegni con campi elettromagnetici, supporto di telecomunicazioni (televisione, segnali di ponti radio, mezzi di aiuto alla radionavigazione, ecc.).
- Gli aerogeneratori possono interferire con le telecomunicazioni, ma il problema può essere facilmente risolto:
  - limitando l'installazione di macchine eoliche a qualche Km di distanza da aeroporti o ripetitori;
  - installando collegamenti via cavo nel caso di cattiva ricezione dei segnali televisivi nelle abitazioni più prossime alla centrale.

# Ubicazione ed impatto ambientale

Rumore

Interferenze elettroniche

Impatto visivo

Effetti su flora e fauna

Emissioni indirette

- Le zone “a vocazione eolica” sono spesso anche di buon pregio paesaggistico e di notevole valore ambientale;
- Gli aerogeneratori sono visibili in ogni



assumere la tonalità del cielo),

- adozione di configurazioni geometriche regolari con macchine ben distanziate.

# Ubicazione ed impatto ambientale

Rumore

Interferenze elettromagnetiche

Impatto visivo

Effetti su flora e fauna

Emissioni indirette

- Per la flora non risultano effetti misurabili;
- Per quanto riguarda la fauna, sono i volatili a subire, in qualche misura, effetti dovuti alla presenza dei generatori eolici: rischio di collisione con le pale;
- Le specie più influenzate sono quelle dei rapaci mentre gli uccelli migratori sembrano adattarsi alla presenza degli ostacoli;
- Il numero di uccelli che muoiono è comunque inferiore a quello dovuto al traffico automobilistico, ai pali di luce e telefono;
- Uno studio danese ha mostrato che una schiera di aerogeneratori di un chilometro ha sugli uccelli effetti paragonabili a quelli di un chilometro di autostrada e inferiori a quelli di un chilometro di linea elettrica AT;
- Una corretta ubicazione di un impianto eolico dovrà comunque tenere in conto l'eventuale interferenza con le vie di migrazione dell'avifauna.

# Ubicazione ed impatto ambientale

Rumore

Interferenze elettromagnetiche

- L'energia eolica può essere considerata una forma di energia largamente rispettosa dell'ambiente nonostante non possa essere considerata completamente esente da

Si può concludere che il numero dei luoghi che si presterebbero all'installazione di una centrale eolica, in virtù delle loro caratteristiche anemologiche, si riduce considerevolmente a causa delle limitazioni fin qui esposte.

comunque di lieve rilevanza tanto da poter affermare con sicurezza che il bilancio costi ambientali/benefici è ampiamente positivo.



# Comparazione ambientale con altre forme di produzione di energia elettrica

Tecnologia	SO <sub>2</sub> (kg/GWh)	NO <sub>x</sub> (kg/GWh)	CO <sub>2</sub> (t/GWh)	CO <sub>2</sub> e CO <sub>2</sub> eq. per CH <sub>4</sub> (t/GWh)
Combustione carbone	630-1370	630-1560	830-920	1240
Nucleare	NA	NA	NA	28-54
Gas	45-140	650-810	370-420	450
Idroelettrico larga scala	18-21	34-40	7-8	5
Idroelettrico scala media	38-46	71-86	16-20	NA
Idroelettrico scala piccola				
<b>Eolico:</b>	24-29	46-56	10-12	2
<b>4,5 m/sec.</b>	<b>18-32</b>	<b>26-43</b>	<b>19-34</b>	<b>NA</b>
<b>5,5 m/sec.</b>	<b>13-20</b>	<b>18-27</b>	<b>13-22</b>	<b>NA</b>
<b>6,5 m/sec.</b>	<b>10-16</b>	<b>14-22</b>	<b>10-17</b>	<b>11</b>
Fotovoltaico:				
monocristallino	230-295	270-340	200-260	NA
multicristallino	260-330	250-310	190-250	228
amorfo	135-175	160-200	170-220	NA
Geotermica	NA	NA	NA	50-70
Maree	NA	NA	NA	2

Sviluppo dell'energia eolica per il raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto nell'ambito dell'Unione Europea

# Obiettivi per lo sfruttamento delle rinnovabili

- La Commissione Europea ha stabilito la meta del raggiungimento del 12% nella penetrazione di energie rinnovabili nell'Unione entro il 2010.
- L'European Wind Energy Association (EWEA) ha stabilito nel 1997 lo stesso obiettivo in vista del 2010

<b><i>1991</i></b>	<i>4.000 MW nel 2000 100.000 MW nel 2030</i>
<b><i>1997</i></b>	<i>8.000 MW in 2000 40.000 MW nel 2010 100.000 MW nel 2020</i>
<b><i>2000</i></b>	<i>60.000 MW nel 2010 (incl.5000 MW offshore) 150.000 MW nel 2020 (inclusi 50.000MW offshore)</i>

# Proiezioni sullo sfruttamento dell'energia eolica (2001-2010)

Anno	Nuova Capacità (%)	Crescita annuale della nuova capacità (%)	Capacità cumulata (MW)	Crescita annuale della capacità cumulata (%)	Fattore di capacità	Energia prodotta (TWh)
2000	---	---	12800	---	0,20	22,5
2001	4500	26,7	17300	35,2	0,25	32,4
2002	5700	3,5	23000	32,9	0,25	44,8
2003	5900	3,4	28900	25,7	0,26	58,3
2004	6100	3,3	35000	21,1	0,26	72,2
2005	6300	2,4	41300	18,0	0,26	86,5
2006	6450	2,3	47750	15,6	0,27	101,8
2007	6006	2,3	54350	13,8	0,27	117,4
2008	6750	2,2	61100	12,4	0,27	133,3
2009	6900	1,4	68000	11,3	0,28	150,3
2010	7000	---	75000	10,3	0,28	167,4

# Stima delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dal ricorso a fonte eolica nella Comunità Europea

Anno	Energia prodotta (TWh)	Riduzioni di CO <sub>2</sub> (Mt/anno)	Riduzioni cumulate CO <sub>2</sub> (Mt/anno)
2001	9,9	7,4	7,4
2002	22,3	16,5	23,9
2003	36,7	26,7	50,6
2004	50,6	36,2	86,8
2005	64,9	45,8	132,6
2006	82,7	57,4	190,0
2007	98,3	67,2	257,0
2008	14,2	76,8	334,0
2009	135,4	89,5	423,0
2010	152,6	99,2	523,0

# Riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in relazione all'impiego di energia eolica nei vari Stati membri della U.E.

Stato	Capacità installata 2001-2010 (MW)	Energia prodotta (TWh)	Riduzione CO <sub>2</sub> nel 2010 (Mt/anno)	Obiettivi Protocollo Kyoto (Mt/anno CO <sub>2eq.</sub> )	Contributo energia eolica (%)
Austria	423	0,99	0,49	67,4	0,7
Belgio	237	0,55	0,29	132,2	0,2
Danimarca	2600	6,06	4,42	53,4	8,3
Finlandia	461	1,07	0,70	77,1	0,9
Francia	5934	13,83	8,99	551,8	1,6
Germania	21900	51,03	38,27	965,6	4,0
Grecia	1511	4,22	3,80	129,6	2,9
Irlanda	1384	3,23	2,26	60,4	3,7
Italia	3280	7,64	4,20	486,8	0,9
Lussemburgo	40	0,09	0,04	7,3	0,5
Olanda	2060	4,80	2,40	197,6	1,2
Portogallo	1400	3,26	2,71	82,6	3,3
Spagna	12800	29,83	20,80	317,5	6,6
Svezia	2270	5,29	2,64	73,4	3,6
Gran Bretagna	5600	13,05	7,18	649,4	1,1

# Impianti minieolici

- Impianti eolici di piccola taglia >1 kW
- HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*-generatori ad asse orizzontale)
- VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*-generatori ad asse verticale)
- Dimensioni ridotte e semplicità di installazione: si adattano bene a insediamenti privati e aziende

## **Vantaggi :**

- Assenza di qualsiasi tipo d'emissione inquinante
- Risparmio dei combustibili fossili
- Costi competitivi
- Manutenzione ridotta
- Basso impatto ambientale
- L'impianto può fruire dei benefici derivanti dal meccanismo dello scambio sul posto. In questo caso, la turbina può essere abbinata ad un impianto fotovoltaico anche preesistente.

<b>Potenza elettrica erogata a velocità nominale</b>	<b>Diametro rotore</b>	<b>Altezza palo</b>	<b>Applicazioni tipiche</b>
Qualche centinaio di watt	1 ÷ 2 m	2 ÷ 6 m	Imbarcazioni, camper, piccole utenze isolate
Da 1 kW a 6 kW	2 ÷ 5 m	6 ÷ 8 m	Abitazioni, strutture commerciali e PMI, installazioni a terra o su tetto anche in ambito urbano, utenze isolate o connesse alla rete elettrica
Oltre 6 kW fino a 60 kW	5 ÷ 18 m	8 ÷ 30 m	Agriturismi, camping, villaggi, strutture commerciali, aziende agricole e PMI, per installazioni a terra e utenze connesse alla rete elettrica
Oltre 60 fino a 200 kW	18 ÷ 30 m	30 ÷ 60 m	Aziende Agricole e PMI, per installazioni a terra e utenze connesse alla rete elettrica

Fonte: Enel

# Componenti principali

- un miniaerogeneratore
- **struttura di sostegno** del miniaerogeneratore a una certa altezza rispetto al suolo in modo da aumentarne la resa energetica e il livello di sicurezza (tipicamente un palo in ferro e la struttura in cemento armato di fondazione dello stesso) ;
- un **sistema di comando e controllo** del mini-generatore e un sistema di condizionamento dell'energia elettrica da esso prodotta, in modo che questa possa essere immessa in rete;
- un **contatore** che misura l'energia elettrica immessa in rete.

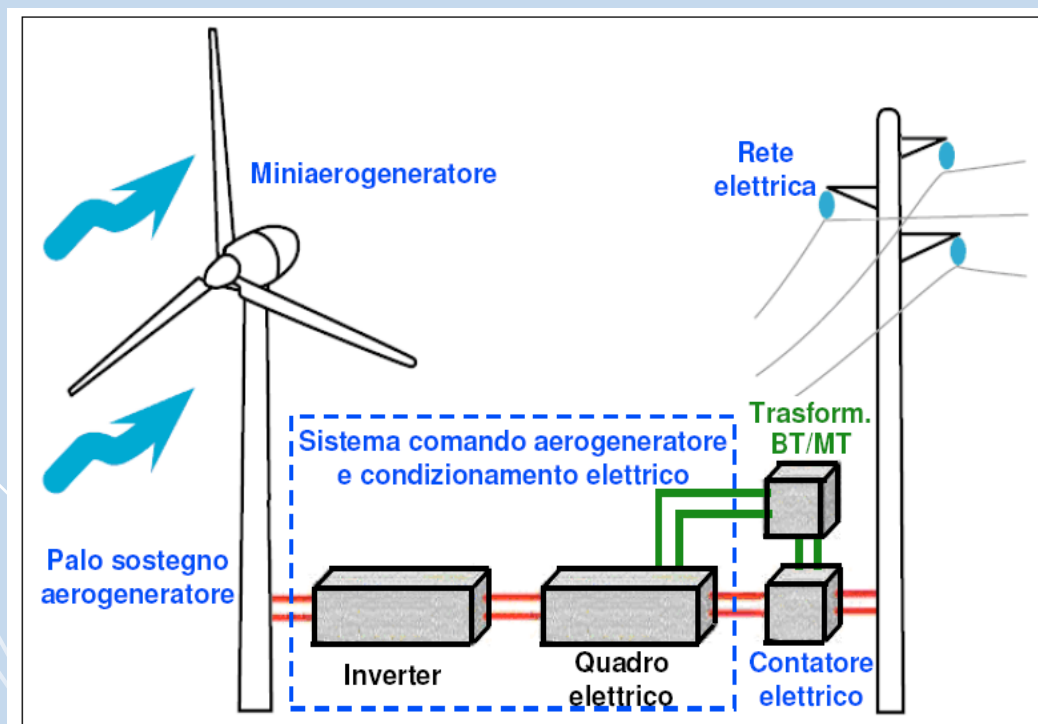


Fig. 2.1 – Schema tipico di un impianto minieolico collegato alla rete.



# Miniaerogeneratori ad asse verticale

## Classificazione:

In base al principio di funzionamento

## Miniaerogeneratori a resistenza (drag):

Esempio: turbine eoliche Savonius (le ideò nel 1924)

Sono macchine ad asse verticale con pale che coprono l'intera area spazzata.

Sono conformate in modo tale da offrire alta resistenza ("drag") sulla pala che si muove in direzione parallela e nello stesso verso del vento incidente, e resistenza ridotta sulla pala che si muove nel verso opposto.

## Miniaerogeneratori a portanza (lift):

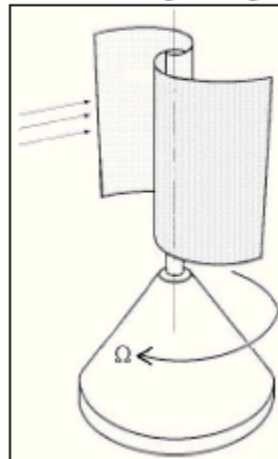
Esempio: turbine eoliche Darrieus

Hanno invece pale opportunamente sagomate a profilo aerodinamico che coprono solo una piccola percentuale dell'area spazzata, come avviene nelle macchine ad asse orizzontale.

In questi casi, le pale sono tenute in rotazione da una forza ("lift") normale al flusso del vento, di natura analoga a quella che sostiene l'ala di un aereo.

### Miniaerogeneratori tipo Savonius

Schema di principio



Versione derivata



### Miniaerogeneratori tipo Darrieus

Versione originale



Versione derivata



# Miniaerogeneratori ad asse verticale

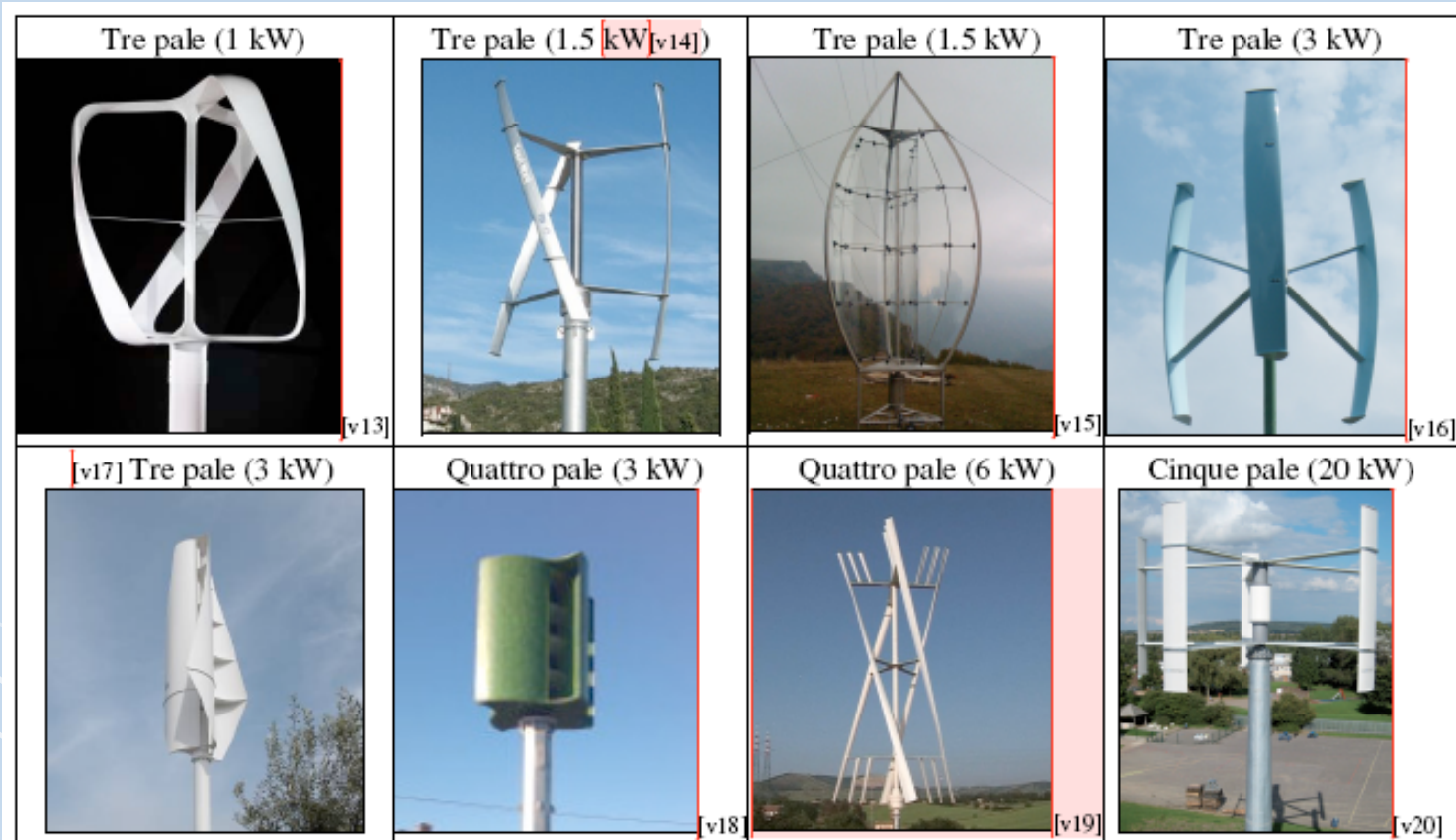


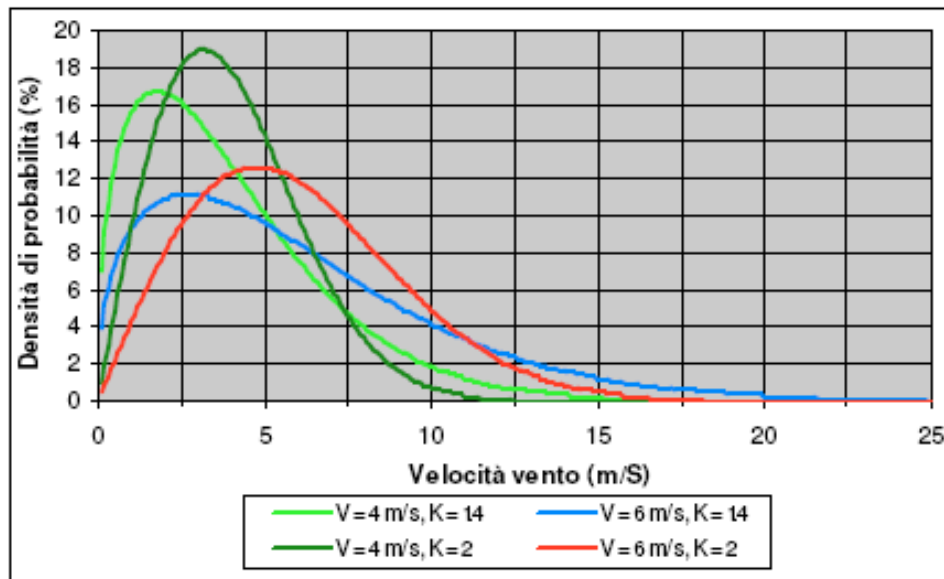
Fig. 2.4 – Esempi di miniaerogeneratori ad asse verticale.

# Energia elettrica producibile da minieolico

Si parte dalle curve della distribuzione delle velocità del vento

Le altezze dal suolo sono modeste

In Italia, la velocità media annua del vento  $V$  può essere ritenuta compresa tra 4 e 7 m/s (valori più probabili intorno ai 5 m/s)



**Fig. 2.12 – Curve delle densità di probabilità di quattro diverse distribuzioni delle velocità del vento durante l'anno secondo il modello di Weibull.**

# Energia elettrica producibile da minieolico

Prodotta annualmente, per velocità del vento comprese in un generico intervallo dell'ampiezza di 1 m/s

$$E_{P1m/s} = 8760 * f_{(v_{1m/s})} * P_{R(v_{1m/s})} * dis$$

Dove:

8760 ore di un anno

$f_{(v_{1m/s})}$  = densità di probabilità della distribuzione del vento in un anno valutata in intervalli di 1 m/s

$P_{R(v_{1m/s})}$  = curva della potenza elettrica immessa in rete valutata in intervalli di 1 m/s

$dis$  = disponibilità dell'impianto e della rete in cui si immette l'energia elettrica

# Esempio di un impianto minieolico 2 kW installato presso Amga Energia di San Mauro Pascoli (Cesenatico)-monitorato dal GSE

Potenza nominale [kW]		2
Asse di rotazione		Orizzontale
Meccanismo di orientamento		Sopravento con timone
Velocità del vento [m/s]	Cut-in	3
	Nominale	10
	Cut-out	25
	Sopravvivenza	45
Attivazione dell'aerogeneratore		Autonoma con vento
Numero di pale		3
Materiale delle pale		Fibra di vetro
Velocità rotazione pale [rpm]	Minima	400
	Massima	500
Diametro del rotore [m]		3,2
Sostegno		Palo tubolare autoportante
Altezza da terra del mozzo [m]		8
Moltiplicatore		Assente
Generatore elettrico		Sincrono

Tab. 5.1 – Caratteristiche tecniche indicate per il sistema minieolico monitorato.



Fig. 5.5 – Miniaerogeneratore da 2 kW e torre anemometrica installati a Cesenatico.

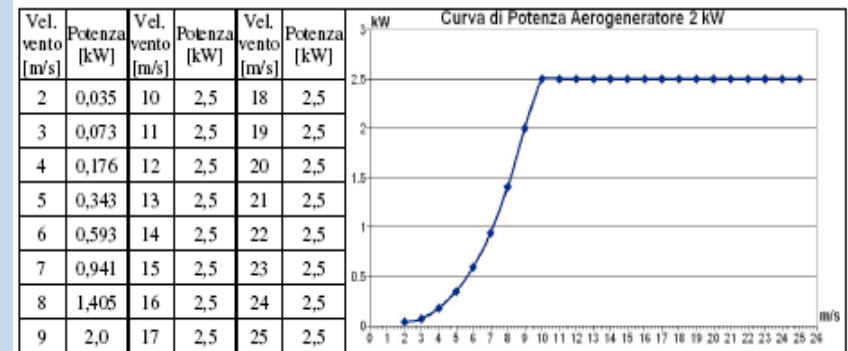


Fig. 5.6 – Curva di potenza indicata per il sistema minieolico monitorato.

# Impianti microeolici

- Impianti eolici di piccola taglia <1 kW

## Applicazioni:

- Alimentazione di utenze isolate stand alone e off-grid
- Alimentazione di sistemi di telecomunicazione (ripetitori, antenne di telefonia mobile installate a distanza dalla rete elettrica).
- Sistemi di pompaggio e drenaggio (es.siti da bonificare)
- Utenze di illuminazione pubblica(strade, viadotti, gallerie, fari, piattaforme, impianti semaforici, etc)
- Alimentazione di utenze isolate all'interno di aree naturali protette



## Esempio micro-eolico

Generatore eolico 500 Wp con inverter di rete incorporato

Tre turbine ad asse verticale

Lunghezza	1300 mm
Larghezza	680 mm
Altezza	1300 mm
Peso	37 kg
Potenza nominale	144 W (velocità vento 11 m/s)
Potenza max	500 W (velocità vento 18 m/s)
Range tensione output	48-57 VDC
Tensione nominale output	48 VDC

