

F. Bignucolo – Impianti di produzione dell'energia elettrica

**SEZIONE B – IMPIANTI DI PRODUZIONE A FONTE RINNOVABILE**

*Capitolo 6*

Impianti eolici

1

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

**L'evoluzione mondiale del settore eolico**

**GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017**

Anno	Capacità (MW)
2001	6,500
2002	7,270
2003	8,133
2004	8,207
2005	11,531
2006	14,703
2007	20,310
2008	26,850
2009	38,475
2010	39,062
2011	40,635
2012	45,030
2013	36,023
2014	51,675
2015	63,633
2016	54,642
2017	52,573

Source: GWEC

**Potenza installata annualmente**

- Forte espansione nella prima decade del 2000
- Crescita grossomodo costante negli ultimi anni

**GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017**

Anno	Capacità Cumulata (MW)
2001	23,900
2002	31,100
2003	39,431
2004	47,620
2005	59,091
2006	73,957
2007	93,924
2008	120,696
2009	159,052
2010	197,956
2011	238,110
2012	282,850
2013	318,697
2014	369,862
2015	432,680
2016	487,657
2017	539,581

Source: GWEC

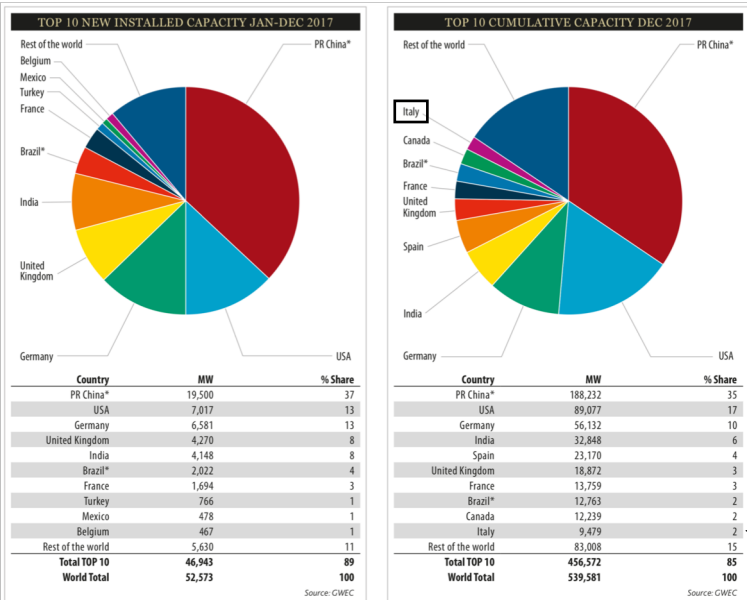
**Potenza installata cumulata a dicembre 2017**

- Il settore è ancora in crescita
- La potenza installata è ancora superiore a quella fotovoltaica (~400 GW) → Diverso trend di crescita atteso
- La producibilità unitaria dell'eolico è maggiore di quella del fotovoltaico →  $E_{wind} > E_{FV}$

2

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## L'evoluzione mondiale del settore eolico

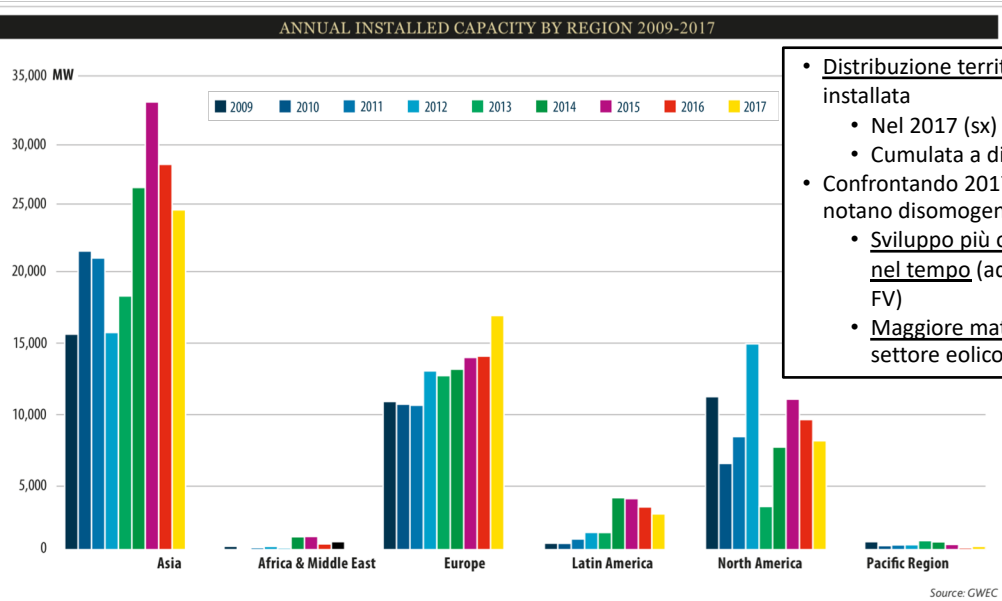


- Distribuzione territoriale della potenza installata
  - Nel 2017 (sx)
  - Cumulata a dicembre 2017 (dx)
- Confrontando 2017 e cumulato, non si notano disomogeneità elevate
  - Sviluppo più omogeneo del settore nel tempo (ad esempio rispetto al FV)
  - Maggiore maturità industriale del settore eolico rispetto ad altri

85% della potenza installata mondiale è allocata in 8 paesi

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

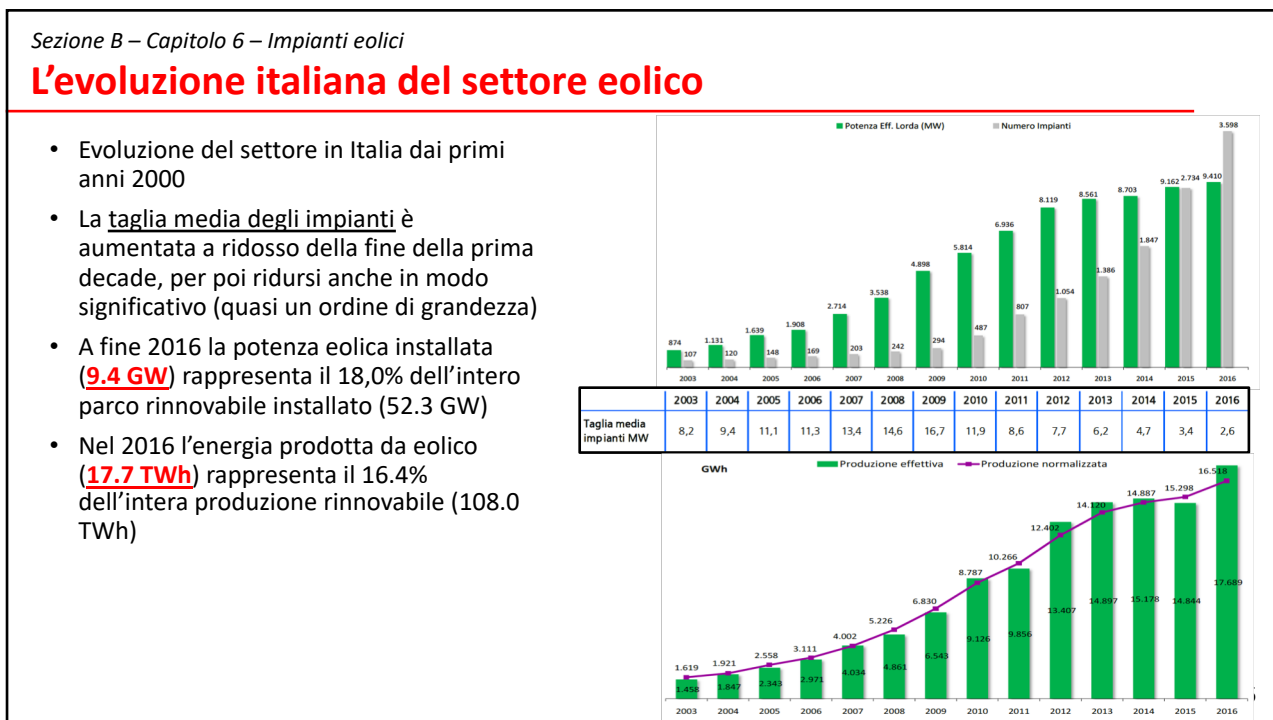
## L'evoluzione mondiale del settore eolico



- Distribuzione territoriale della potenza installata
  - Nel 2017 (sx)
  - Cumulata a dicembre 2017 (dx)
- Confrontando 2017 e cumulato, non si notano disomogeneità elevate
  - Sviluppo più omogeneo del settore nel tempo (ad esempio rispetto al FV)
  - Maggiore maturità industriale del settore eolico rispetto ad altri



5

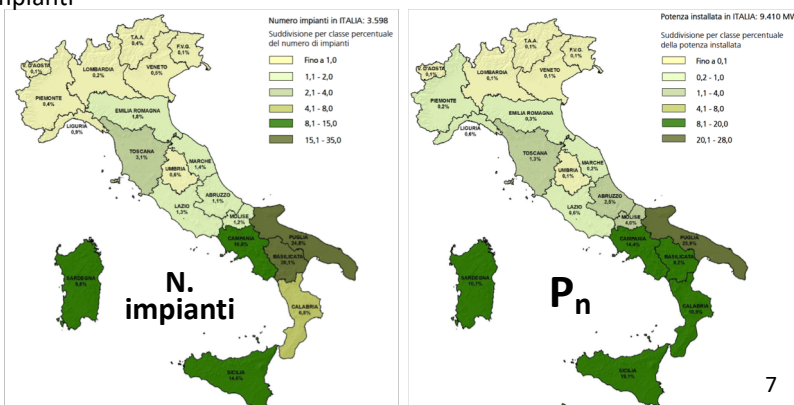


Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## L'evoluzione italiana del settore eolico

- In termini di potenza installata, gli impianti realizzati sono prevalentemente di grande taglia (>10 MW), quindi connessi alla rete di trasmissione Terna (AT/AAT) →  $P_{n,media,AT} = 30$  MW
- Non si sono registrate particolari agevolazioni nella autorizzazione e realizzazione degli impianti
  - La localizzazione degli impianti è conseguente alla disponibilità di energia primaria
- Gli impianti sono prevalentemente finalizzati alla completa immissione di potenza in rete
  - Gli impianti sono tipicamente allocati in contesti isolati
  - Gli strumenti di incentivazione premiavano l'immissione in rete e non la produzione

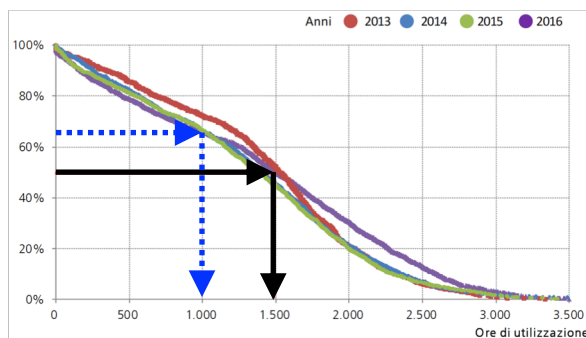
Classi di potenza	n°	Potenza (MW)	Energia (GWh)	Produttività (h <sub>eq</sub> /y)
P ≤ 1 MW	3.203	378	541	1.431
1 MW < P ≤ 10 MW	115	605	1.051	1.737
P > 10 MW	280	8.426	16.096	1.910
<b>Totale</b>	<b>3.598</b>	<b>9.410</b>	<b>17.689</b>	<b>1.880</b>



Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

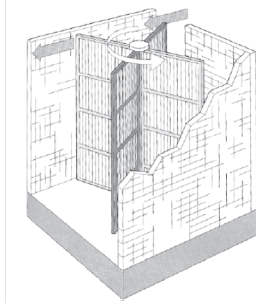
## L'evoluzione italiana del settore eolico

- La produzione eolica è maggiormente sensibile a fenomeni micro-climatici inter-stagionali e variazioni sulla disponibilità primaria tra i diversi anni
  - Produttività media 2013: 1740 MWh/MW
  - Produttività media 2014: 1744 MWh/MW
  - Produttività media 2015: 1620 MWh/MW
  - Produttività media 2016: 1880 MWh/MW
- Esempi di calcolo di produttività (anno 2016)
  - Produttività media: 1880 MWh/MW
  - Almeno il 50% degli impianti (1799 su 3598) ha funzionato per meno di 1500 h<sub>eq</sub>
  - Per effetto della difficile caratterizzazione della fonte, molti degli impianti realizzati hanno produttività spiccatamente inferiore al valore soglia di convenienza economica
    - 1/3 degli impianti (in numero) non raggiunge le 1000 h<sub>eq</sub> (si ricorda che solo il 24% del numero degli impianti sono stati installati nel 2016 (864 su 3598))
    - La produttività unitaria aumenta con la taglia (impianti meglio ottimizzati) → 1910 MWh/MW per centrali >10 MW



Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Sfruttamento della fonte primaria



Primi esempi di sfruttamento dell'energia eolica (2.000 a.C.)



Mulini per macinazione o pompaggio di acqua



Generatore di Jacobs (anni '30)



Generatore di Smith-Putnam

• **Caratteristica richiesta alla fonte primaria:**

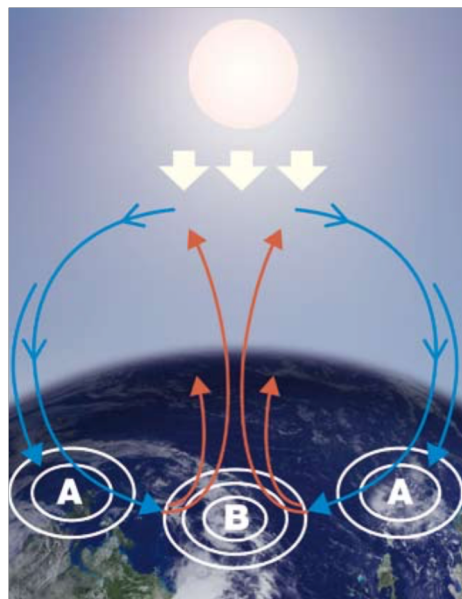
- Disponibilità di vento su un arco temporale opportunamente ampio
- Opportune caratteristiche (es. velocità il più possibile costante in un range tra 6-7 e 15 m/s)

9

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Sfruttamento della fonte primaria

- Il vento è lo spostamento di una massa d'aria da un punto a maggiore pressione ad una zona a pressione inferiore

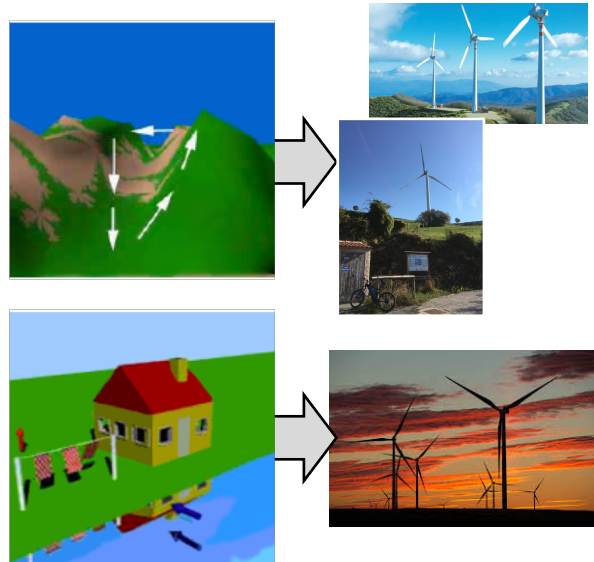


10

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Sfruttamento della fonte primaria

- Il vento è lo spostamento di una massa d'aria da un punto a maggiore pressione ad una zona a pressione inferiore
- Tali spostamenti si originano per effetto di
  - Rotazione terrestre
  - Profilo altimetrico (orografia)
  - Diverso comportamento termico della superficie terrestre (diverse inerzie termiche presentate da suolo e masse d'acqua)
- Conformazione del terreno e altimetria influiscono pesantemente anche sulla direzione preponderante del vento (incanalamento del flusso d'aria tra due ostacoli)

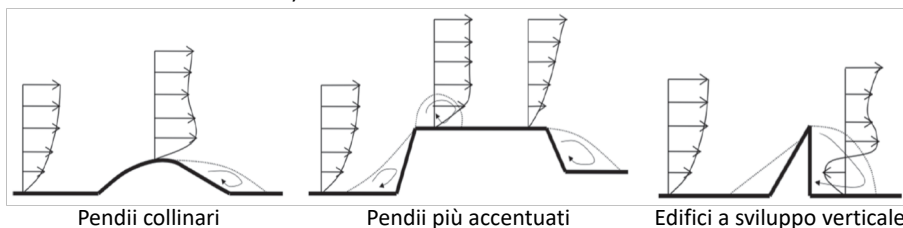


11

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Sfruttamento della fonte primaria

- L'energia eolica ha peculiarità specifiche rispetto alla altre fonti rinnovabili
  - **Fotovoltaico**: l'energia primaria solare è nota con buona accuratezza (database storici di radiazione solare) e la caratterizzazione del sito è possibile con un dettagliato sopralluogo (es. ombreggiamenti)
  - **Eolico**: necessaria una caratterizzazione puntuale del sito, anche per mezzo di misure estese nel tempo
    - I database disponibili tendono a essere meno dettagliati rispetto a quelli relativi alla radiazione solare
    - L'installazione di dispositivi di rilevamento è meno agevole (necessario monitorare il vento alla quota di rotore) → Dispositivi anemometrici con strutture di dimensioni significative
    - Necessario caratterizzare l'effetto di ostacoli, barriere e incanalamenti (non solo nelle immediate vicinanze del sito in analisi)

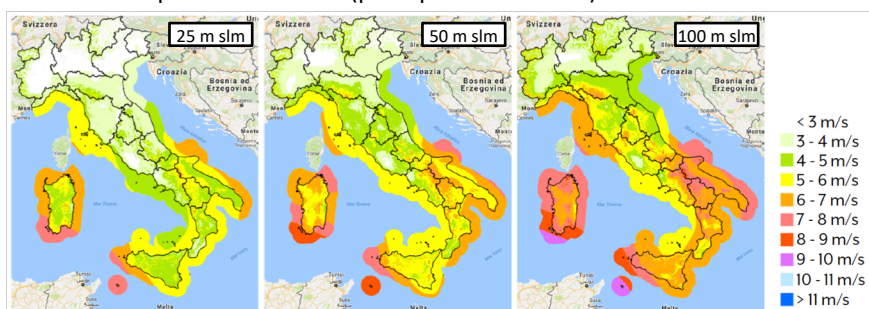


12

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Caratterizzazione della fonte eolica

- Un primo database della fonte eolica fornisce indicazioni sulle **velocità medie del vento** a diverse altezze dal piano del terreno
  - Aumentando l'**altezza dal terreno**, aumenta la disponibilità della risorsa eolica (si riducono i fenomeni di turbolenza generati dalle irregolarità della superficie terrestre)
  - Gli impianti **off-shore** sono tendenzialmente caratterizzati da una maggiore producibilità unitaria
    - Vincoli di distanza dalla costa (collegamento elettrico alla rete, profondità del fondo e ancoraggio della torre)
    - Impatto ambientale (principalmente visivo) e influenza sulle traiettorie navali



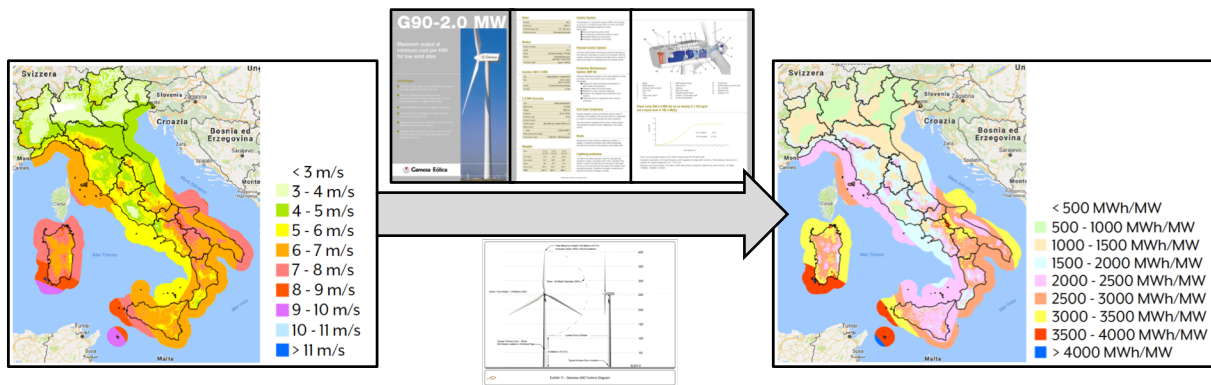
Esempio di database eolico riferito all'Italia  
<http://atlanteeolico.rse-web.it>

13

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Caratterizzazione della fonte eolica

- È possibile stimare la producibilità annuale di un sito considerando
  - Distribuzione statistica del vento
  - Velocità media del vento
  - Caratteristiche dell'aerogeneratore (dimensioni, velocità caratteristiche, rendimenti aerodinamico, rendimento meccanico, rendimento elettrico, ecc.)



4

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Caratterizzazione della fonte eolica

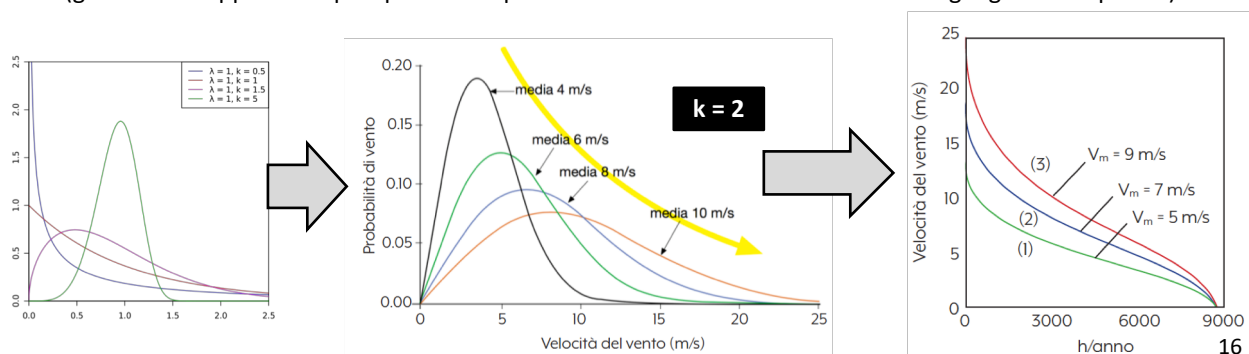
- **Quando un sito è potenzialmente interessante?**
  - Aspetti da considerare
    - Prezzi della tecnologia
    - Costi di sviluppo dell'impianto (indagine iniziale, conseguimento del titolo autorizzativo, sviluppo del cantiere e della connessione alla rete)
    - Tariffe di mercato e relativo outlook (andamento atteso di domanda e offerta, valori di chiusura del mercato, partecipazione ad altri mercati)
    - Eventuali forme di incentivazione o altra agevolazione (es. priorità di dispacciamento sul mercato)
  - Poco appetibili siti con ventosità inferiore a 2.000-2.200 MWh/MW annui (durata di funzionamento equivalente alla potenza nominale pari a 2.000-2.200 h/anno)
  - La disponibilità primaria deve essere dimostrata da una opportuna campagna anemometrica sul campo, su un intervallo temporale opportunamente esteso (alcuni anni)

15

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Distribuzione statistica di Weibull

- La distribuzione probabilistica del vento può essere modellata con la distribuzione di Weibull
  - Parametro di scala  $\lambda$
  - Parametro di forma  $k$
- La distribuzione del vento è caratterizzata da  $k$  intorno a 2
- Dalla distribuzione probabilistica è possibile elaborare la curva di durata annuale della velocità del vento (grafico che rappresenta per quanto tempo in un anno una certa velocità è stata uguagliata o superata)





Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

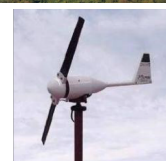
- Taglia
- Tipologia di conversione eolico-meccanica
- Tipologia di rotore
- Metodo di controllo della potenza massima
- Destinazione d'uso

17

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

- **Taglia**
  - La **potenza nominale** (o taglia) di un impianto eolico è pari alla somma della potenza nominale di ciascun aerogeneratore componente il sito eolico)
  - Classificazione correlata al livello di tensione al quale l'impianto è connesso, ovvero, con riferimento alla normativa italiana (valori analoghi a quelli riportati per gli impianti fotovoltaici)
    - **Grandi impianti**, connessi alle reti AT: potenza nominale dell'impianto superiore a 10 MW
    - **Impianti di taglia media**, connessi alle reti MT: potenza nominale dell'impianto tra 0,1 e 10 MW
    - **Impianti di piccola taglia**, connessi alle reti BT: potenza nominale dell'impianto non superiore a 100 kW
    - **Micro e mini impianti**: siti solitamente composti da un unico aerogeneratore di taglia fino a qualche kW



18

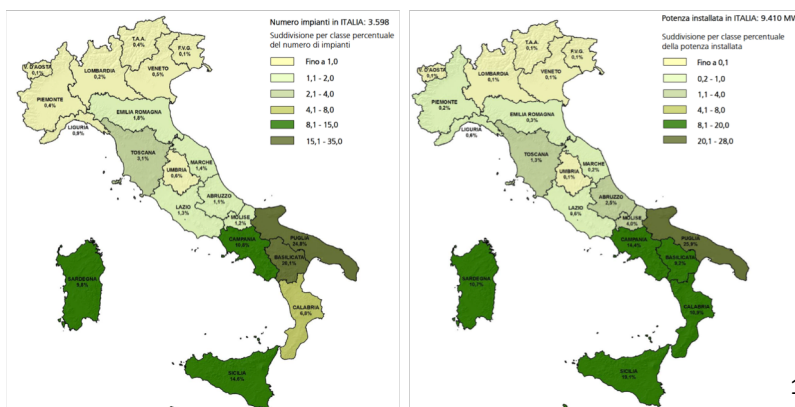
Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

• **Taglia**

- Gli **impianti fotovoltaici** in Italia sono principalmente attestati alle reti di distribuzione MT e BT (Generazione Distribuita)
- Gli **aerogeneratori** hanno un elevato **fattore di scala dei costi** [€/kW] in relazione alla taglia → La taglia tipica degli impianti eolici in Italia comporta la loro connessione alla **rete di trasmissione** (esercitata a 132-150 kV)

Classi di potenza	n°	Potenza (MW)	Energia (GWh)
P ≤ 1 MW	3.203	378	541
1 MW < P ≤ 10 MW	115	605	1.051
P > 10 MW	280	8.426	16.096
<b>Totale</b>	<b>3.598</b>	<b>9.410</b>	<b>17.689</b>



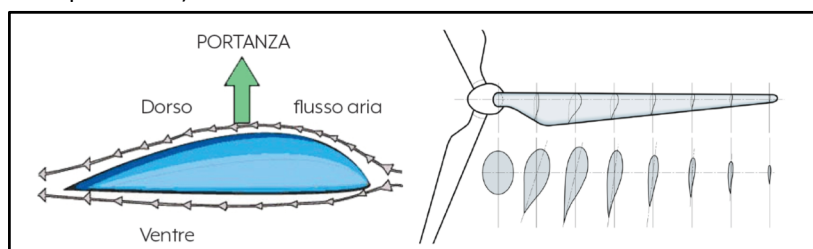
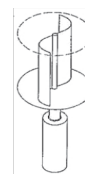
19

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

• **Tipologia di conversione eolico-meccanica**

- **Pale a resistenza:** trasmissione di potenza avviene per la spinta meccanica del vento su una superficie incidente, costituita dalle pale (es. turbine Savonius) →
- **Pale a portanza:** sfruttano l'azione aerodinamica sul profilo alare delle pale
  - Le due diverse lunghezze del profilo superiore (dorso) e inferiore (ventre) delle pale comportano diverse velocità di scorrimento dell'aria → A parità di temperatura,  $v \uparrow$  comporta  $p \downarrow$  → Gradiente di pressione (portanza)
  - La sezione trasversale delle pale deve essere diversa in funzione della distanza dall'asse di rotazione per massimizzare l'efficienza di conversione (in funzione della velocità relativa tra pala e aria)



20

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

- **Tipologia di rotore**

- **Rotori ad asse verticale**

- Bassa velocità nominale di rotazione
    - Macchine auto-avvianti anche con basse velocità del vento (velocità di cut-in di 2-3 m/s)
    - Auto-orientanti con la direzione del vento
    - Elevata resistenza anche alle alte velocità
    - Pale a resistenza (es. Savonius), pale a portanza (es. Darrieus) o soluzioni miste
    - Basso rendimento di conversione
    - Taglie piccole → Limitata emissione sonora e impatto visivo → Installazioni in ambienti urbani o sub-urbani



Esempi di aerogeneratori ad asse verticale (da sx a dx)

- Savonius
- Windside
- Darrieus
- Soluzione mista Savonius-Darrieus
- Ropatec

21

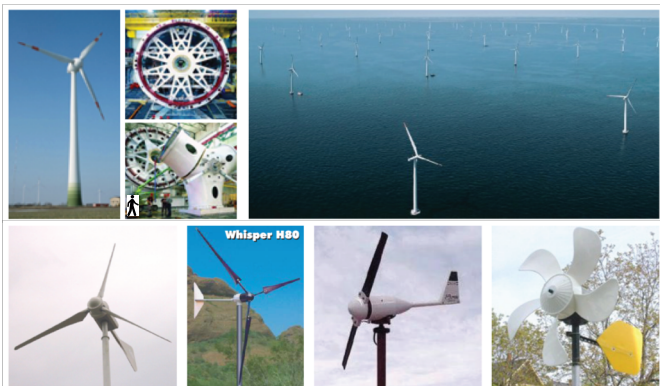
Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

- **Tipologia di rotore**

- **Rotori ad asse orizzontale**

- Sfruttamento dell'intera area spazzata dalle pale
    - Maggiori valori di rendimento di conversione
    - Pale a portanza nelle applicazioni medie e grandi, ad azione mista per aerogeneratori di piccola taglia



Esempi di aerogeneratori ad asse orizzontale:

- Aerogeneratore Enercon E112, 4,5 MW/torre, D = 110 m
- Impianto off-shore realizzato con aerogeneratori Vestas V80, 80 torri, 2 MW/torre, D = 72 m
- Aerogeneratore 20 kW
- Aerogeneratore 1 kW, D = 3 m
- Aerogeneratore 250 W, D = 1,25 m
- Micro-eolico multi-pala

22

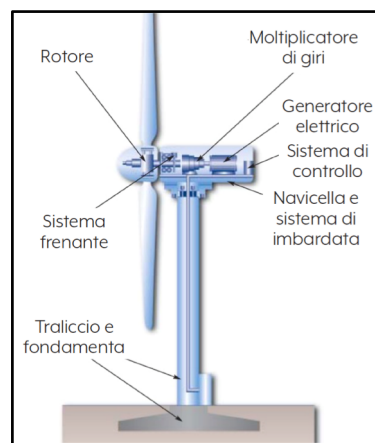
Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

- **Tipologia di rotore**

- **Rotori ad asse orizzontale**

- **Navicella e sistema di imbardata.** Contiene gli organi principali, sia di potenza che di controllo. Il sistema di imbardata può essere meccanico-idraulico (torri di grande taglia) o semplicemente aerodinamico (pinna nei piccoli impianti)
    - **Traliccio e fondamenta.** Le fondazioni dipendono sostanzialmente dal tipo di terreno e di installazione (in-land o off-shore), possibilità di torri galleggianti
    - **Rotore** con pale in fibra di vetro o fibra di carbonio (grandi installazioni), in metallo o in materiale plastico (torri di piccola potenza). Regolazione del passo delle pale (pitch control) per ottimizzare il rendimento di conversione o frenare intenzionalmente le macchine
    - **Sistema frenante:** dispositivo per limitare la velocità di rotazione in presenza di forti raffiche. È sempre previsto almeno un dispositivo meccanico per l'arresto in caso di emergenza
    - **Moltiplicatore di giri:** è richiesto nelle applicazioni non completamente disaccoppiate dalla rete elettrica, per limitare il numero di coppie polari statoriche



23

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

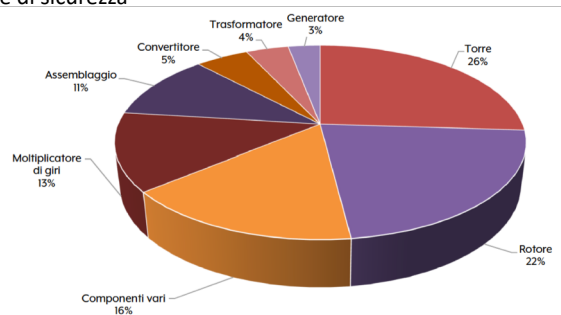
- **Tipologia di rotore**

- **Rotori ad asse orizzontale**

- **Generatore elettrico:** generatore asincrono a velocità ~costante, generatore asincrono con alimentazione delle correnti rotoriche, generatore direct drive
    - **Sistema di controllo:** gestisce l'impianto nelle sue funzioni operative (controllo della potenza, regolazione del passo, ecc.) e di sicurezza

Richiedono una valutazione ad-hoc i costi per l'ancoraggio a terra della torre (tipologia di suolo) e i costi di connessione alla rete

Potenza nominale	4.5 MW	Massa della torre (struttura tubolare in acciaio)	220 t
Numero di pale	3	Altezza della torre (in dipendenza dalle condizioni locali del vento)	90-120 m
Diametro del rotore	120 m	Diametro della torre alla base	5.5 m
Controllo	inclinazione della pala e velocità variabile	Velocità di rotazione del rotore	9-15 giri/min
Lunghezza della pala	58 m	Rapporto del moltiplicatore di giri	100-1
Corda massima della pala	5 m	Velocità del vento di avviamento della turbina	4 m/s
Massa di una pala	18 t	Velocità del vento nominale	12 m/s
Massa della gondola con rotore a pala	220 t	Velocità del vento di arresto della turbina	25 m/s



Ripartizione percentuale del costo di una torre eolica di grande taglia, per i componenti più onerosi

24

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

### • Metodo di controllo della potenza massima

- Per esigenze dimensionali e di sicurezza, in caso di forte vento, è necessario limitare la velocità di rotazione del rotore e di conseguenza la potenza meccanica trasmessa al generatore elettrico (senza questo accorgimento,  $P$  crescerebbe con  $v^3$ )
- Metodologie implementate:
  - Stallo: oltre una certa velocità del vento, l'aerogeneratore si disallinea rispetto alla direzione ortogonale al vento → Cala l'area esposta → Cala la potenza trasmessa
  - Controllo del passo: regolazione dell'angolo di rotazione delle pale lungo il proprio asse (controllo del passo)
    - Si porta intenzionalmente il rotore a lavorare in condizioni non ottimali per limitare la potenza meccanica trasferita



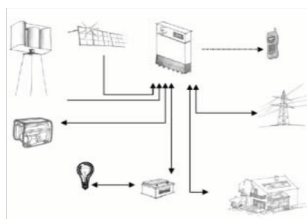
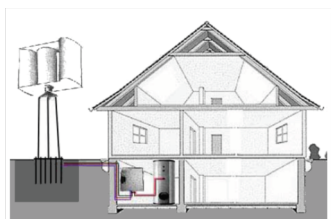
25

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Classificazione degli impianti eolici

### • Destinazione d'uso

- Impianti grid-connected, allacciati alla rete in accordo con le regole di connessione vigenti
- Applicazioni off-grid: impianti solitamente di piccola taglia, realizzati come metodo di alimentazione elettrica in contesti non normalmente serviti dalla rete elettrica
  - Sistemi di riscaldamento per applicazioni domestiche, terziarie e serre (risparmio sul costo di combustibili per il riscaldamento e la produzione di acqua calda)
  - Alimentazione di piccole applicazioni elettriche locali: sistemi drenaggio acqua, stazioni meteo o telecomunicazioni, baite, illuminazione, insegne
  - Alimentazione di piccole reti in isola in abbinamento ad altre fonti energetiche rinnovabili o fossili ed eventualmente sistemi di accumulo a batterie

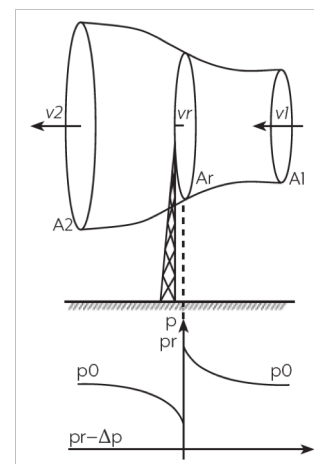


26

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia eolica → meccanica

- L'energia eolica è rappresentabile come tubo di flusso d'aria in movimento con un certo regime di velocità  $v_1$
- Il flusso d'aria del tubo di flusso di sezione  $A_1$  intercetta l'ostacolo (rotore)
  - L'aria viene rallentata dalla presenza dell'ostacolo, mentre la pressione aumenta fino a  $p_r$
- Attraversando l'area del rotore, il flusso d'aria gli cede energia
  - Spessore del rotore trascurabile rispetto alle dimensioni del tubo di flusso → Variazione di pressione a gradino ( $\Delta p$ )
  - La differenza di pressione consente il trasferimento di potenza dal tubo di flusso al rotore
- A valle dell'attraversamento dell'area del rotore, l'aria tende a riportarsi alla condizione imperturbata di pressione
  - La pressione aumenta fino alla pressione atmosferica che è presente molto a monte e molto a valle del rotore ( $p_0$ )
- Attraversando l'area del rotore la velocità del vento viene ridotta ( $v_2 < v_1$ ) → L'area del tubo di flusso in uscita ( $A_2$ ) sarà maggiore rispetto a  $A_1$



27

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia eolica → meccanica

- È possibile studiare la conversione eolica con la teoria di Betz
- Tale teoria definisce un limite teorico (massimo) di rendimento di conversione
- Ipotesi:
  - Condizioni perfettamente indisturbate sia a monte che a valle dell'impianto (sezioni  $A_1$  e  $A_2$ )
  - Nessun altro ostacolo incrocia il tubo di flusso d'aria
  - Vento stazionario e indipendente dalla quota (trascurati gli effetti di attrito legati alla conformazione del suolo, che riducono la velocità del vento a basse quote)
- Il salto di pressione sul rotore è pari a

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2)$$

- Introducendo il fattore di interferenza a, la potenza meccanica trasferita

$$a = 1 - \frac{v_r}{v_1} = \frac{v_1 - v_r}{v_1}$$

$$P = \rho A_r v_1^3 2a(1-a)^2$$

28

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia eolica → meccanica

- Poiché  $P = f(a)$ , si può verificare che  $P$  è massima se  $a = 1/3$
- La massima potenza eolica convertibile in meccanica è quindi pari a

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho \pi R^2 v_1^3$$

- Estrahendo la formula della potenza eolica del tubo di flusso, è possibile esplicitare il rendimento di conversione, definito **coefficiente di performance  $c_p$**

$$P = c_p \left[ \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_1^3 \right] = c_p P_{wind}$$

- Esiste un **valore massimo teorico** del rendimento di conversione →  $c_{p,max} = 16/27 = 59,3\%$
- Il valore effettivo del coefficiente  $c_p$  dipende da
  - Modalità costruttive del rotore
  - Presenza ed efficacia del sistema di regolazione del passo delle pale
  - Velocità di rotazione dell'albero dell'aerogeneratore
  - Velocità del vento
- I fenomeni di attrito e di turbolenza nel tubo di flusso (trascurate nel modello di Betz) riducono il valore di  $c_p$  effettivamente conseguibile rispetto al suo limite teorico

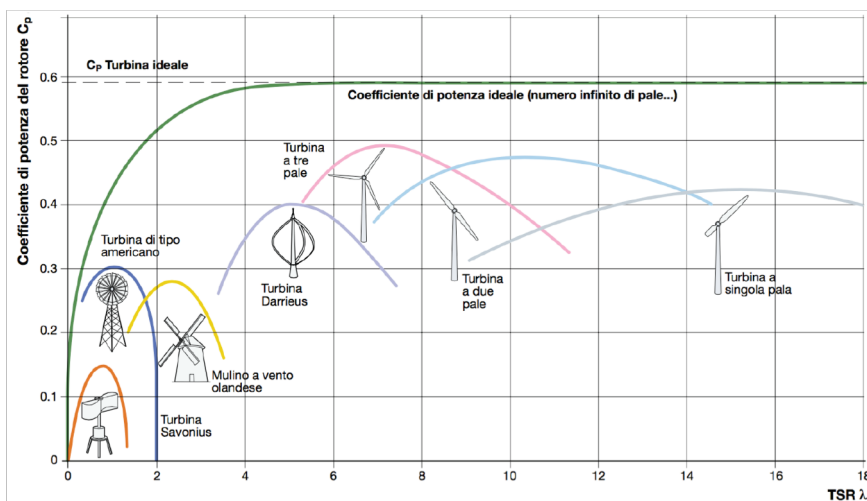
**Dipendenza da  $v^3$**  → Sono sfruttabili siti a ventosità costante, meglio se senza folate intense

29

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia eolica → meccanica

- L'andamento di  $c_p$  è riportato in relazione al **Tip-Speed Ratio (TSR)**, ovvero al rapporto tra velocità tangenziale dell'estremo di una pala e la velocità del vento



Se  $TSR \uparrow$ , sono richieste pale più robuste a causa delle elevate forze centrifughe agenti sull'intero rotore

Se  $TSR \uparrow$ , i livelli di rumorosità possono aumentare significativamente in condizioni di vento intenso

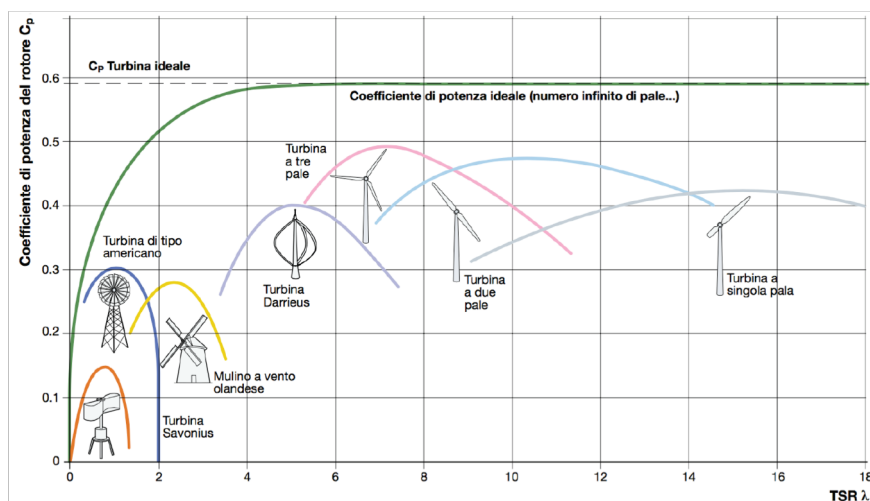
- $v = 25 \text{ m/s}$
- $TSR = 12$
- Velocità assoluta della punta delle pale (300 m/s) è prossima alla velocità del suono

30

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

### Conversione di energia eolica → meccanica

- L'andamento di  $c_p$  è riportato in relazione al **Tip-Speed Ratio (TSR)**, ovvero al rapporto tra velocità tangenziale dell'estremo di una pala e la velocità del vento



Tra le costruzioni ad asse verticale, i rotori a portanza (Darrius) raggiungono  $c_p$  significativamente superiori ai rotori a resistenza

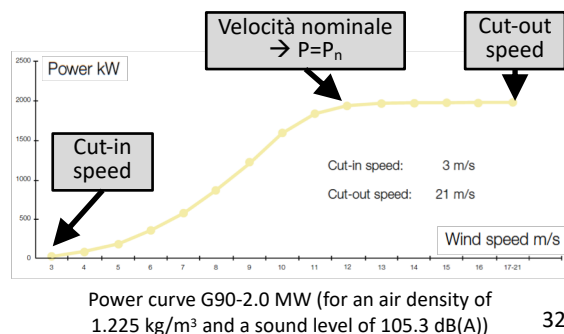
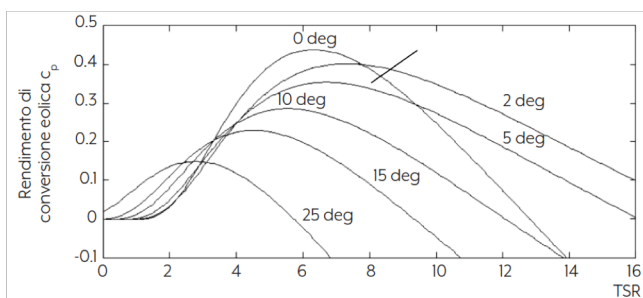
Tra le costruzioni ad asse orizzontale, la configurazione a 3 pale è ottimizzata per TSR nel range 6-9 ( $c_p$  vicino a 50%)

Configurazioni a due o una pala sono ottimizzate per TSR oltre 9 e oltre 14, rispettivamente

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

### Conversione di energia eolica → meccanica

- In una turbina con rotore a regolazione del passo delle pale, la dipendenza del  $c_p$  dal TSR varia in funzione dell'**angolo di passo**
  - Tra avviamento (velocità di cut-in, alcuni [m/s]) e funzionamento a potenza nominale (10-12 [m/s]), il sistema di controllo regola il passo delle pale per massimizzare il rendimento di conversione  $c_p$
  - Raggiunta la potenza nominale, l'angolo di passo delle pale viene controllato per mantenere costante la potenza meccanica trasferita al generatore elettrico (abbassamento intenzionale del  $c_p$ )
    - Si evitano stress meccanici sulle parti in rotazione e sulle parti strutturali in caso di folate di vento oltre la velocità nominale



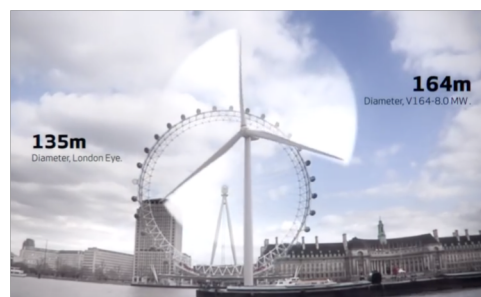
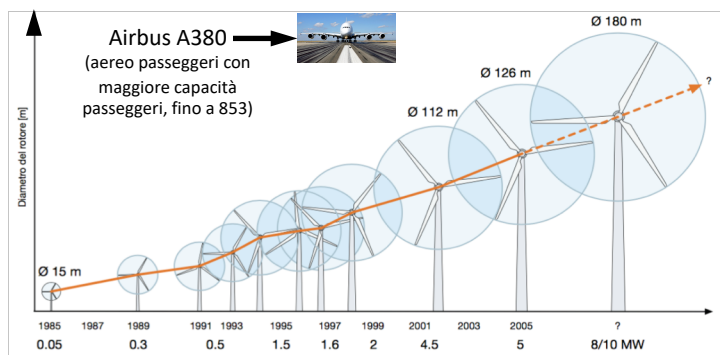
Power curve G90-2.0 MW (for an air density of 1.225 kg/m<sup>3</sup> and a sound level of 105.3 dB(A))



Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia eolica → meccanica

- Confermata la dipendenza lineare tra area spazzata dal rotore e potenza dell'aerogeneratore, a parità di velocità del vento
- Evoluzione tecnologica → Aumento significativo delle dimensioni delle torri (diametro e quindi altezza) → Aumento della potenza nominale dei singoli aerogeneratori
- Un aerogeneratore di taglia multi-MW ha un diametro del rotore ben superiore all'apertura alare di un aereo moderno per il trasporto di passeggeri da oltre 500 posti

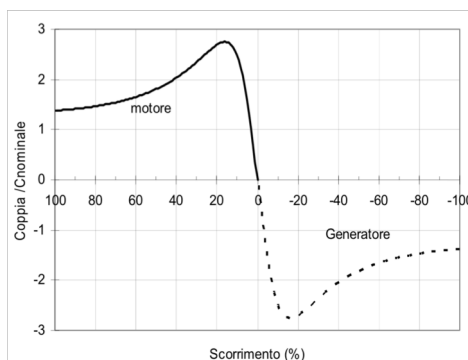
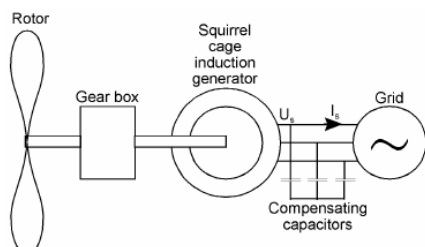


33

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia meccanica → elettrica

- Le prime torri eoliche erano dotate di generatori asincroni
  - Ridotto range di rotazione ammesso → Conversione eolico-meccanica non ottimizzata
  - Necessità di moltiplicatore di giri (meccanico) per limitare il numero delle coppie polari sullo statore del generatore
  - Necessità di installazione di sistemi di rifasamento per correggere il fattore di potenza della macchina (un generatore asincrono assorbirebbe una potenza reattiva induttiva significativa)

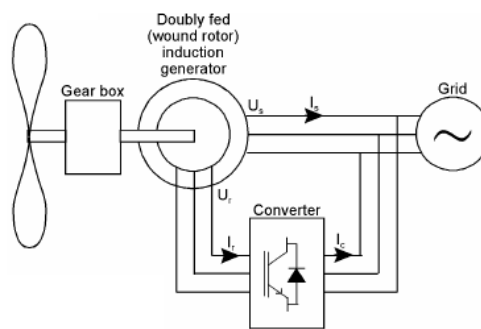


34

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia meccanica → elettrica

- Sistemi a velocità variabile con moltiplicatore di giri → **Doubly-Fed Induction Generator, DFIG**
  - È ancora necessario il moltiplicatore di giri (meccanico) per limitare il numero delle coppie polari sullo statore del generatore
  - Le correnti rotoriche sono controllate in frequenza → Si mantiene il corretto sfasamento tra campo magnetico di rotore e campo magnetico di statore anche a velocità di rotazione variabile
  - Viene massimizzato il rendimento di conversione agendo in modo coordinato su inverter e regolatore di passo delle pale
  - Il convertitore elettronico di potenza riceve l'alimentazione dalla rete
  - La taglia del convertitore elettronico è una parte della taglia dell'aerogeneratore (circa 30%)
  - È la tecnologia di aerogeneratori più diffusa sul mercato attualmente

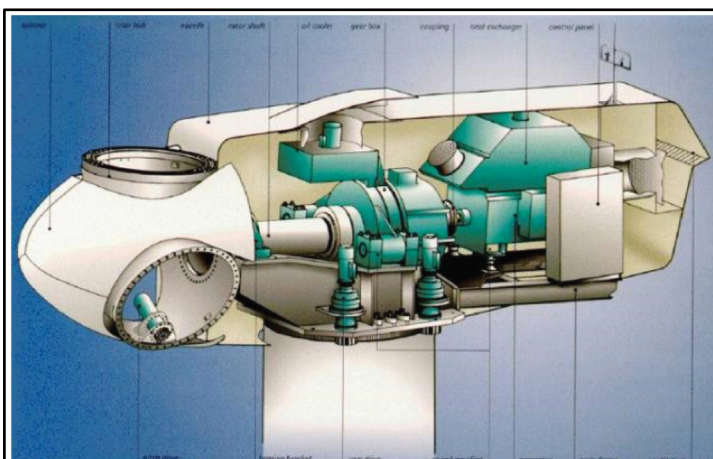


35

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

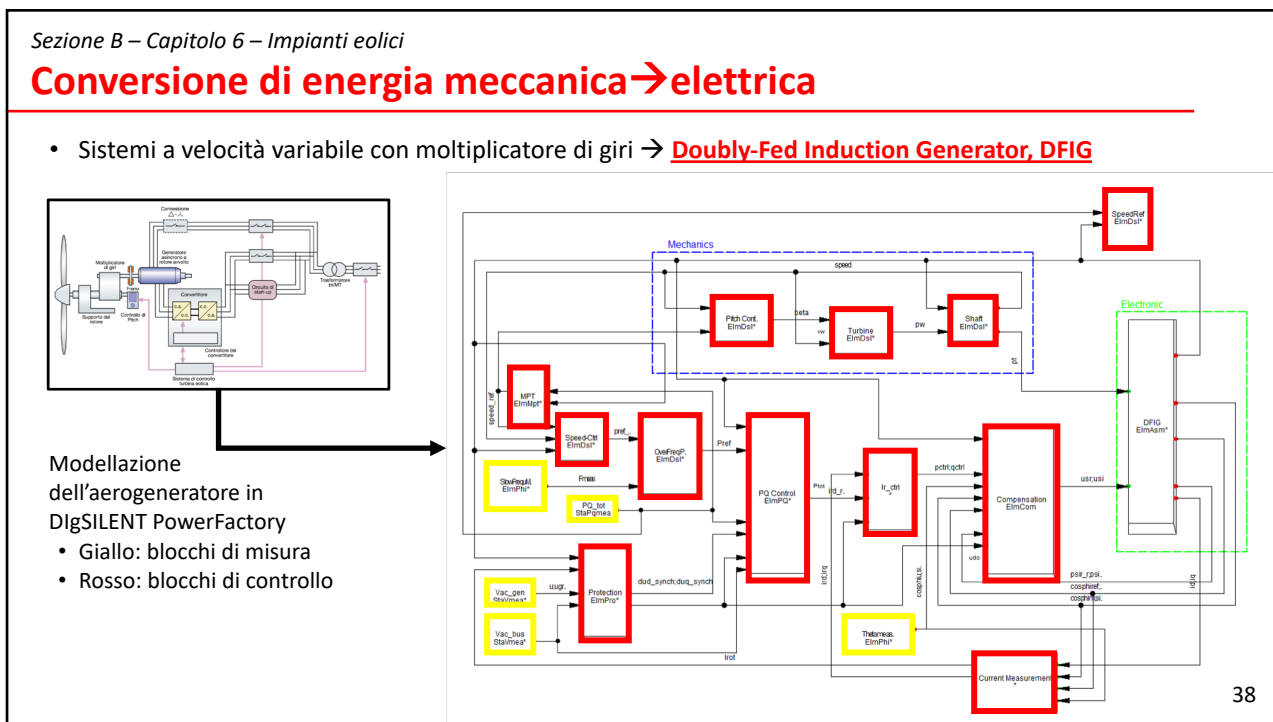
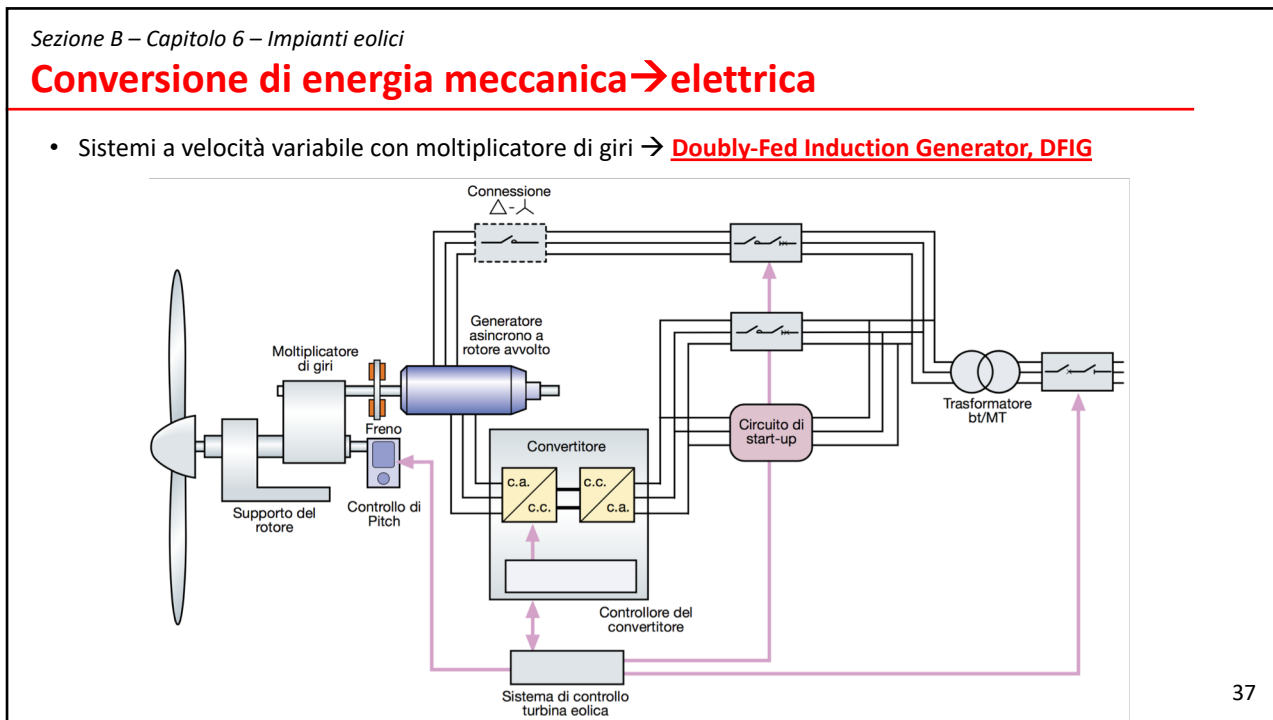
## Conversione di energia meccanica → elettrica

- Sistemi a velocità variabile con moltiplicatore di giri → **Doubly-Fed Induction Generator, DFIG**



► Figura 6.18 Navicella di una torre con conversione meccanica-elettrica con generatore DFIG. Si noti l'ingombro del moltiplicatore di giri tra rotore e generatore elettrico.

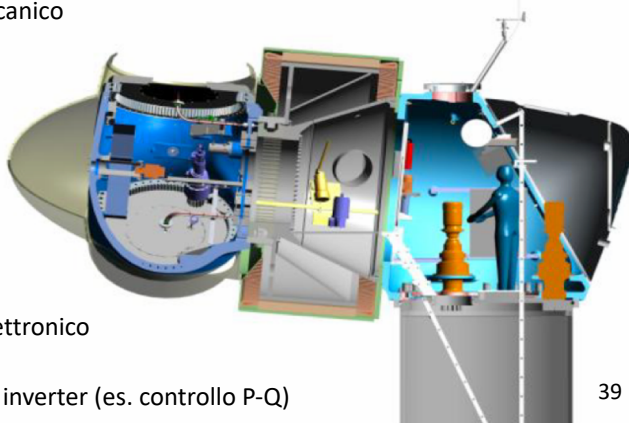
36



Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia meccanica → elettrica

- Sistemi a velocità variabile **Direct Drive** senza moltiplicatore di giri
  - Analogia con impianti mini-hydro (es. turbina Dive)
  - Il generatore sincrono è direttamente installato sull'albero di trasmissione collegato al rotore
  - La generazione avviene a frequenza variabile (in funzione del regime di rotazione meccanica)
  - Può essere omesso il moltiplicatore di giri meccanico
    - Maggiore rendimento complessivo
    - Minore peso navicella → Dimensionamento meccanico di navicella, sostegno e fondazioni
    - Minori costi di installazione e manutenzione
- Può essere utilizzato un generatore elettrico a magneti permanenti
- Full converter → È richiesto un convertitore elettronico di potenza pari alla taglia della torre eolica
- Benefici dell'interfacciamento alla rete tramite inverter (es. controllo P-Q)

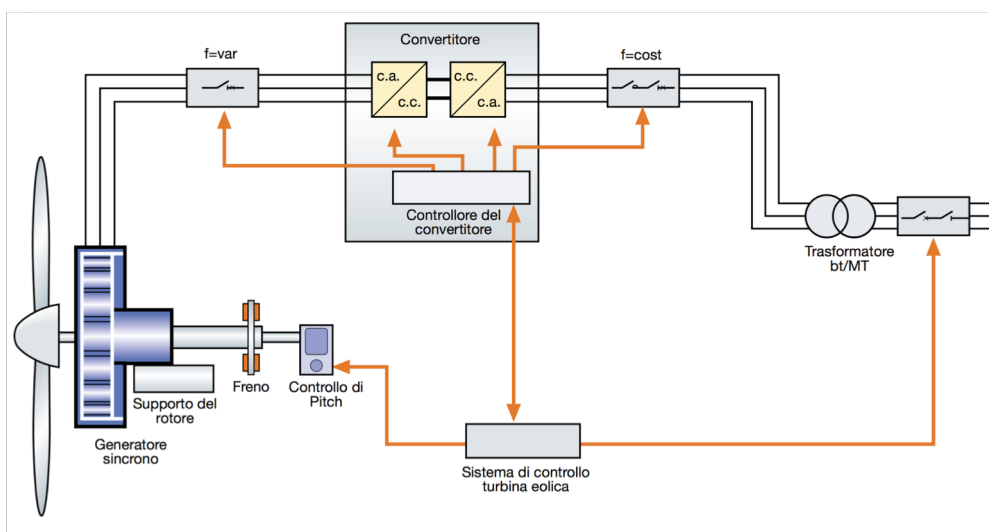


39

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Conversione di energia meccanica → elettrica

- Sistemi a velocità variabile **Direct Drive** senza moltiplicatore di giri



40

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

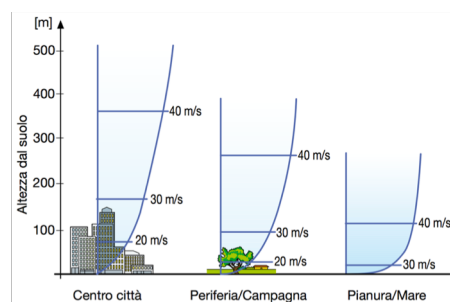
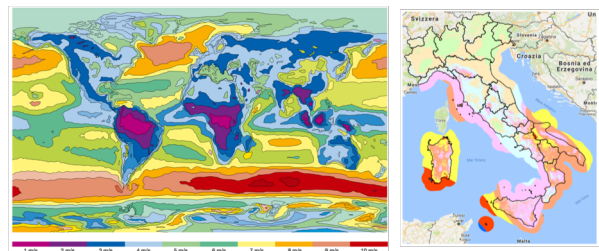
- Limitazioni di tipo economico, tecnico e ambientale, da valutare opportunamente attraverso accurati business plan e valutazioni di impatto ambientale
  - Necessaria caratterizzazione del sito
  - Tempo di ritorno dell'investimento ed esposizione finanziaria
  - Occupazione del suolo
  - Impatto visivo e acustico
  - Interferenze con la fauna locale
  - Impatto sulla rete elettrica

41

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- Necessaria caratterizzazione del sito
  - La caratterizzazione specifica del sito è necessaria e non banale
  - Esistono solo indicazioni grossolane correlazione con le coordinate geografiche del sito (latitudine/longitudine)
  - La caratterizzazione del sito richiede strumentazione adeguata in grado di misurare la risorsa primaria per un tempo sufficientemente esteso
    - Posizionamento dei misuratori il più possibile in condizioni prossime a quelle di installazione → Torri anemometriche con altezza di rilevazione pari a 50 m per evitare i fenomeni distorti che si manifestano vicino al piano nel terreno



42

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- **Tempo di ritorno dell'investimento ed esposizione finanziaria**

- È necessario uno studio accurato preliminare per la caratterizzazione della disponibilità della fonte primaria → Tempo lungo tra l'inizio della valutazione del sito (primi costi di sviluppo) e l'entrata in esercizio dell'impianto (primi ricavi di esercizio)
- Complessità degli iter autorizzativi ed elevata percentuale di mortalità in fase istruttoria
- Condizioni prossime alla grid-parity si possono ottenere solo in contesti molto ventosi, in parte già sfruttati (in Italia)
- La disponibilità eolica aumenta negli impianti off-shore, anche per effetto delle minori turbolenze generate dalle irregolarità del suolo
  - Necessario studiare il punto di trade-off tra maggiore producibilità unitaria conseguibile e costi aggiuntivi di costruzione (fondamenta, rete elettrica di connessione alla terraferma) e gestione
- Incertezze normative limitano l'interesse dei grandi investitori
  - Regime di incentivazione e agevolazione
  - In parte preponderante, modalità di autorizzazione degli impianti

**Ingente esposizione finanziaria**  
(pochi soggetti in grado di affrontare tale investimento iniziale in modo sistematico)

**Tempo di ritorno dell'investimento**  
e  
**Profilo di rischio dell'investimento**  
(es. retroattività di provvedimenti normativi)

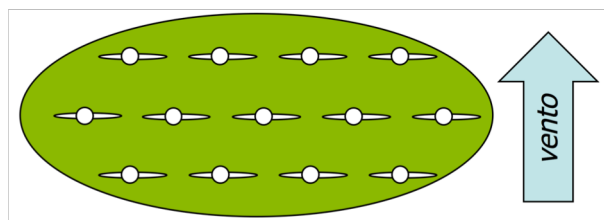
43

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- **Occupazione del suolo**

- In una installazione multi-torre è necessario non pregiudicare la producibilità unitaria dell'intero sito eolico per mutue interferenze tra singoli aerogeneratori
- Problema duale all'ombreggiamento sistematico per cause interne negli impianti fotovoltaici, è opportuno
- Necessario spaziare tra loro le torri sulla stessa fila e distanziare tra loro le varie file consecutive
  - Distanza tra aerogeneratori della stessa fila: >3-5 volte il diametro delle pale
  - Distanza tra file consecutive di aerogeneratori: >5-9 volte il diametro delle pale



44

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

### • Occupazione del suolo

- Area orizzontale lorda occupata da un impianto eolico può variare grossomodo tra 20 e 55 volte l'area complessiva dei rotori utilizzati, detta area spazzata dai rotori
- Si considera un aerogeneratore commerciale di potenza nominale 4,5 MW (diametro del rotore 112 m)
- Valori medi di spaziatura tra aerogeneratori
  - Un impianto eolico di grande taglia occupa circa 7-8 ettari per MW (un valore molto minore si ha con disposizione su unica fila, circa 1/7)
  - A titolo di confronto, la superficie richiesta da un impianto fotovoltaico realizzato con pannelli in silicio cristallino è inferiore a ¼ di questo valore
- È tuttavia opportuno ricordare che i terreni sottostanti un impianto eolico possono continuare ad essere sfruttati per altre lavorazioni (agricoltura o pastorizia)
- Nelle applicazioni off-shore, è necessario garantire l'assenza di interferenze con la viabilità nautica



45

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

### • Impatto visivo

- È inevitabile una modifica del paesaggio adiacente
- L'efficacia di azioni mitiganti l'impatto visivo è piuttosto limitata (es. colorazione di torri, rotore e pale in modo da meglio contestualizzare l'impianto rispetto allo sfondo)
- La sensibilità all'impatto visivo è fortemente soggettiva
  - Tale analisi andrebbe riportata in una valutazione professionale di impatto ambientale, rapportando l'impatto visivo ad altre forme di inquinamento tra cui quello chimico, atmosferico, ecc.



Si percepisce meno l'impatto visivo della linea AT solo perché siamo più abituati a vederla?

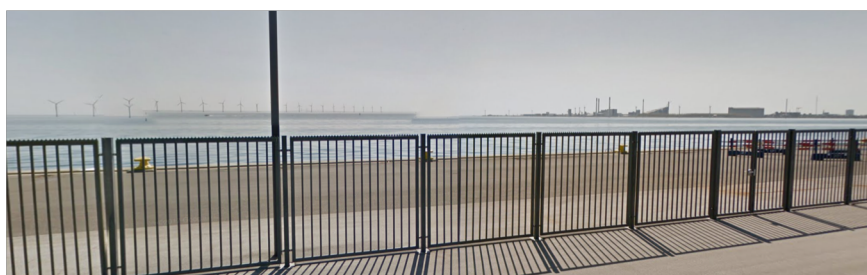
46

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

### • Impatto visivo

- È inevitabile una modifica del paesaggio adiacente
- L'efficacia di azioni mitiganti l'impatto visivo è piuttosto limitata (es. colorazione di torri, rotore e pale in modo da meglio contestualizzare l'impianto rispetto allo sfondo)
- La sensibilità all'impatto visivo è fortemente soggettiva
  - Tale analisi andrebbe riportata in una valutazione professionale di impatto ambientale, rapportando l'impatto visivo ad altre forme di inquinamento tra cui quello chimico, atmosferico, ecc.



Si percepisce meno l'impatto visivo della zona industriale perché la riteniamo «inevitabile» in termini economici e lavorativi?

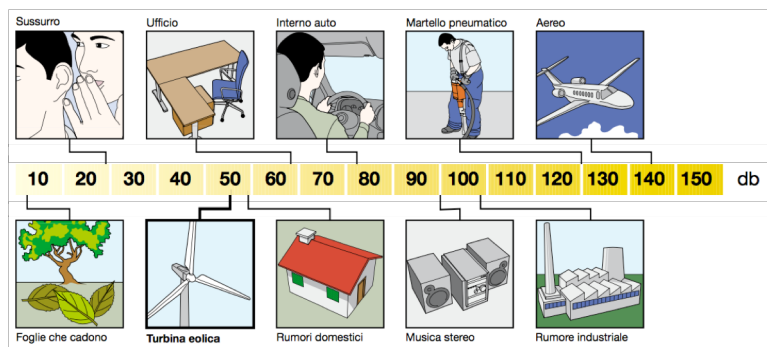
47

Sezione B – Capitolo 6 – Impianti eolici

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

### • Impatto acustico

- In condizioni di forte vento (e aerogeneratore in movimento), alcune parti terminali delle pale possono portarsi a velocità periferiche prossime a quella del suono
  - Frenatura e blocco del rotore anche per limiti di tenuta strutturale
- In condizioni normali, il livello di inquinamento acustico va comparato con altre sorgenti che comunemente interferiscono con la condizione di quiete psico-fisica dell'individuo



L'intensità acustica (Intensity Level, IL) è il rapporto in dB fra il flusso di energia  $I$  e il flusso  $I_0$  della soglia di udibilità ( $10^{-12}$  W/m<sup>2</sup>)

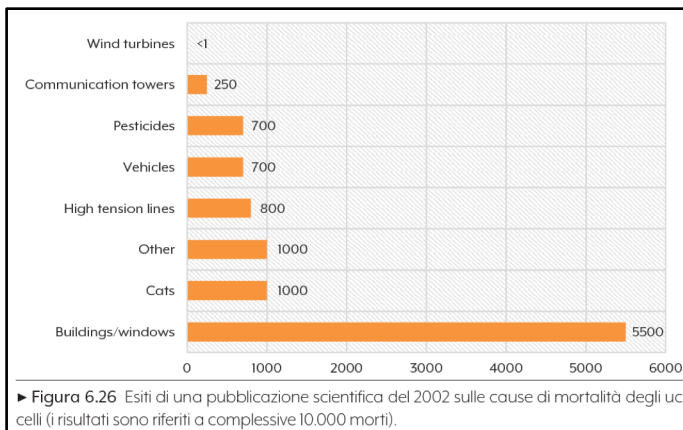
48



## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- **Interferenze con la fauna locale**

- In generale, la presenza di un impianto eolico non modifica in modo sostanziale le cause di mortalità della fauna avicola
- Alcuni studi indagano le cause di morte degli uccelli, sia di tipo meccanico (urto) che chimico (inquinamento)
- La percentuale di morte per urto su un aerogeneratore (pale, navicella o sostegno) è molto inferiore rispetto ad altre cause di mortalità comunque accettate
- Opportuno verificare che non ci siano interferenze con la vita di specie protette o comunque tutelate

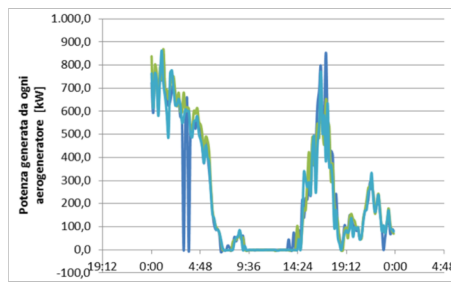
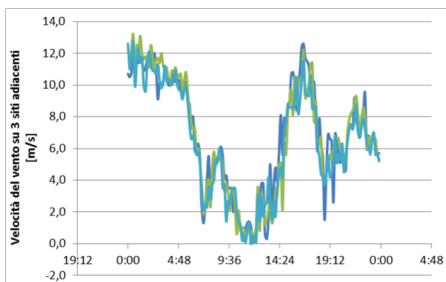


## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- **Impatto sulla rete elettrica**

- **Peculiarità della generazione eolica**

- Elevata variabilità della produzione eolica come conseguenza della sua dipendenza con il cubo della velocità del vento → Variabilità molto maggiore rispetto ad un impianto fotovoltaico
  - Variabilità molto spinta sull'immissione di potenza in rete
  - Interventi tempestivi per la regolazione locale del sistema elettrico (in relazione ai suoi vincoli operativi e alla qualità del servizio da erogare agli utenti)
  - Bilanciamento istantaneo generazione/carico nel sistema complessivo

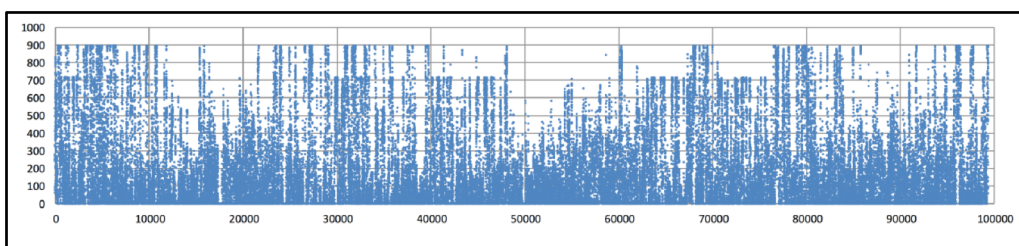


## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- **Impatto sulla rete elettrica**

- **Peculiarità della generazione eolica**

- Le variazioni stagionali di producibilità degli impianti fotovoltaici è piuttosto prevedibile
    - La previsione della produzione eolica è più casuale e meno caratterizzabile, anche su intervalli temporali estesi (es. variazioni mensili/stagionali)
    - Diventa più complesso identificare il parco di generatori tradizionali da mantenere attivi per garantire la stabilità del sistema elettrico



► Figura 6.28 Andamento della potenza generata da un aerogeneratore di potenza nominale 900 kW in un arco temporale di 34 mesi (misure quartorarie).

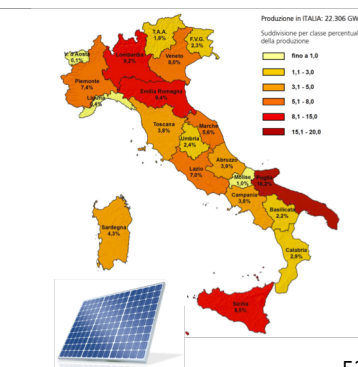
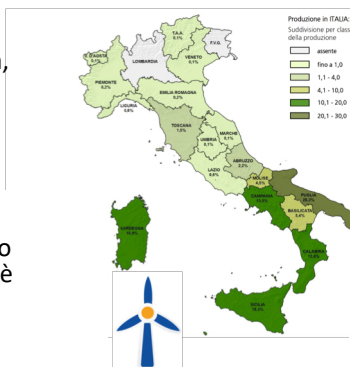
51

## Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- **Impatto sulla rete elettrica**

- **Peculiarità comuni tra generazione fotovoltaica ed eolica**

- Riduzione dell'inerzia di rete → Aumento delle perturbazioni (vedi cap. 5)
    - In Italia, la distribuzione degli impianti eolici (Puglia, Campania, Calabria, Sicilia, Sardegna) non è omogenea con il carico elettrico
      - Percorso medio dell'energia elettrica generata da fonte eolica è maggiore rispetto allo stesso parametro riferito all'energia fotovoltaica, che è caratterizzata da una diffusione più uniforme sul territorio nazionale



52