

Lezioni dal corso di
***'Gestione degli impianti di conversione
dell'energia'***

Università Federico II di Napoli
15/05/2012

INTRODUZIONE AGLI IMPIANTI EOLICI

Cosa sono gli impianti eolici?

Gli impianti eolici sono sistemi che convertono in energia meccanica o elettrica parte dell'energia cinetica che anima correnti di aria ventosa.

Gli impianti eolici che generano in uscita energia elettrica sono detti "aerogeneratori".

Negli impianti eolici l'input energetico proviene dai venti ovvero a spese dell'energia cinetica delle correnti di aria che nascono in seno all'atmosfera per effetto dei dislivelli di pressione conseguenti a distribuzioni di temperatura non uniforme per effetto di diversi livelli di insolazione. Le differenze di pressione e densità all'origine dei venti dipendono anche dalla rugosità superficiale del territorio e dalla latitudine (ovvero dalla forza di Coriolis).

Classificazioni per taglia

Taglia	Potenza [kW]	D _{rotore} [m]	Altezza torre [m]
Piccola*	1-200	1-20	10-30
Media	200-800	20-50	30-50
Grande	1.000	55-80	60-120

*: se $P < 20 \text{ kW}$ usualmente si parla di micro-eolico altrimenti di mini-eolico.

Classificazione per destinazione energia

Le installazioni eoliche possono essere di tipo:

- *grid-connected*
- *stand-alone*.

Gli impianti *grid-connected* sono connessi alla rete nazionale di trasmissione elettrica, nella quale immettono in tutto o in parte la propria produzione. Sono quelli propriamente interessati dagli incentivi.

Gli impianti *stand-alone* alimentano reti elettriche locali al servizio di utenze isolate non raggiunte dalla rete nazionale di trasmissione. In genere, gli impianti eolici di questo tipo lavorano in parallelo con altri sistemi di generazione. Tipicamente, le installazioni di tipo stand-alone rientrano negli impianti di piccola taglia.

Classificazione per localizzazione

Gli impianti eolici possono essere *on-shore*, *near-shore*, *off-shore*.

Gli *on-shore* sono posizionati in terraferma in genere a distanza dalla costa più vicina superiore ai 3 km. Sono di varia taglia, *grid-connected* o *stand-alone*.

I *near-shore* possono essere in terraferma o in mare a distanza dalla costa più vicina rispettivamente non superiore ai 3 o ai 7-10 km. In terraferma sono di varia taglia, *grid-connected* o *stand-alone*; in mare sono tipicamente di elevata taglia e *grid-connected*.

Gli *off-shore* sono impianti posizionati in mare con distanza dalla costa superiore ai 7-10 km. Sono tipicamente di taglia elevatissima e *grid-connected*. La maggior parte delle installazioni *off-shore* sono concentrate nei mari del Nord-Europa caratterizzati da bassi fondali e buona ventosità.

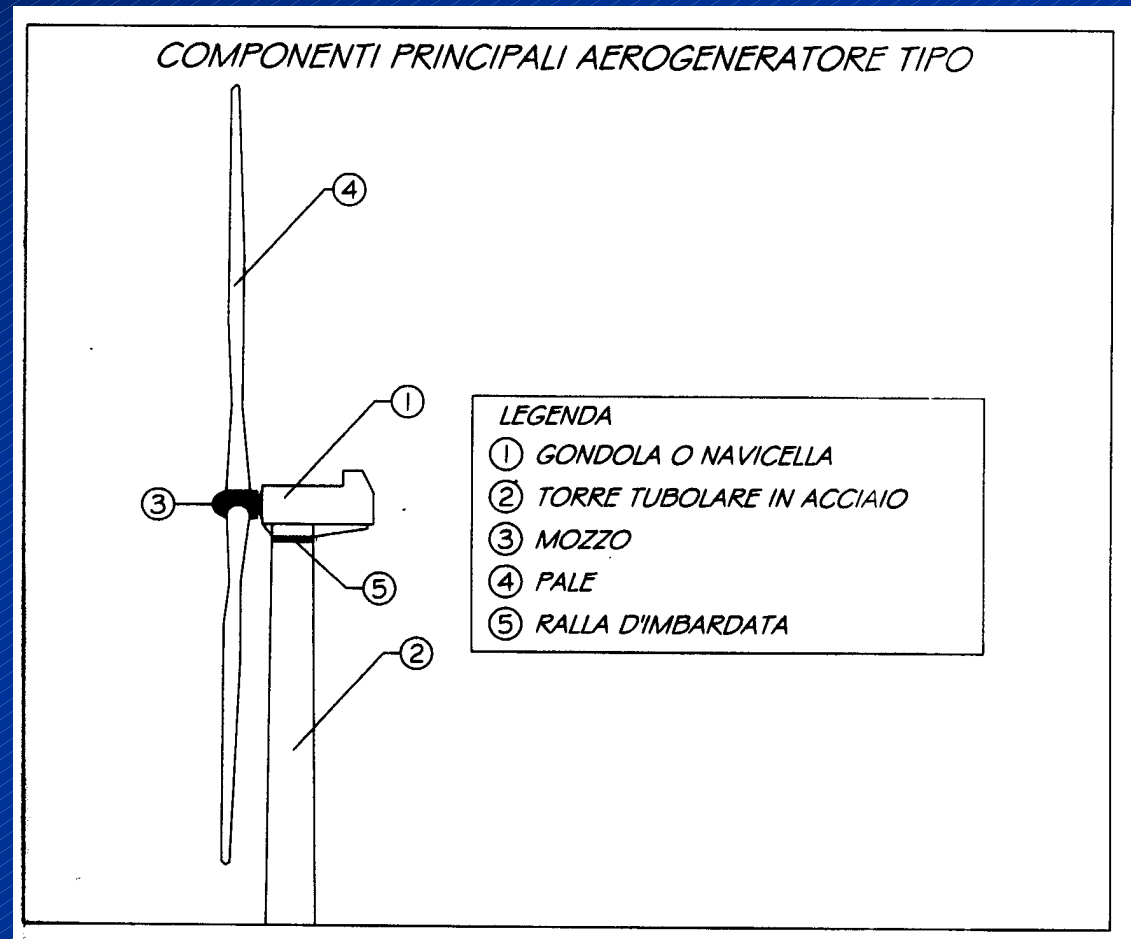
Classificazione per asse di rotazione

L'asse di rotazione del rotore di un aerogeneratore può essere orizzontale o verticale.

Gli aerogeneratori di elevata potenza sono realizzati esclusivamente con rotori ad asse orizzontale.

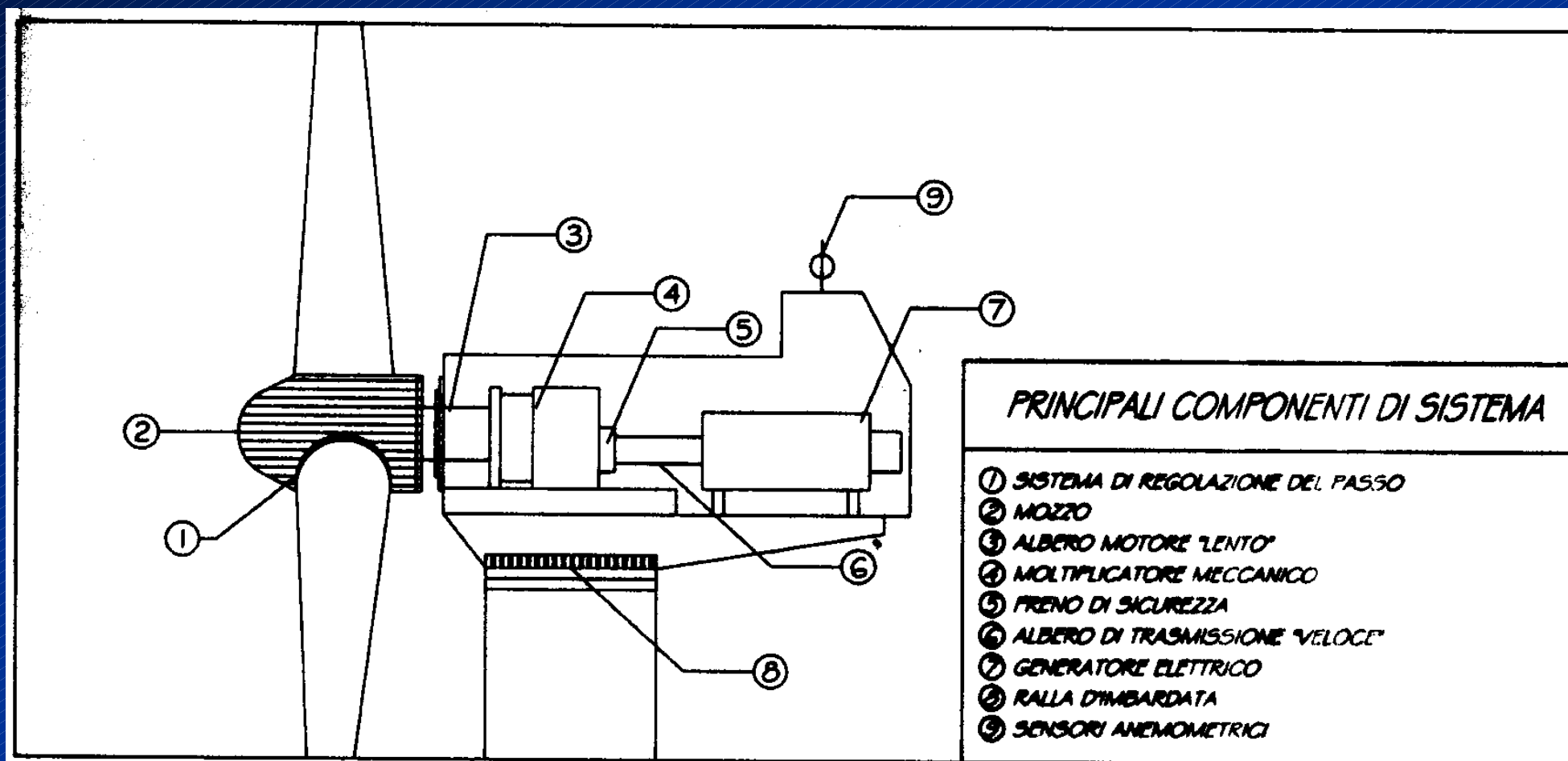
Nel caso di aerogeneratori di piccola taglia, si possono trovare entrambe le disposizioni. In particolare, i sistemi ad asse verticale sono preferibili negli ambienti urbani poiché consentono un minor impatto paesaggistico e sono maggiormente adattabili ai flussi molto turbolenti tipici delle installazioni a quote relativamente basse.

Gli aerogeneratori ad asse orizzontale sono tipicamente costituiti da una "torre tubolare in acciaio" che porta in sommità la "gondola" o "navicella" al cui interno sono alloggiati gli organi di trasmissione del moto e di conversione dell'energia meccanica in elettrica.



Le pale ed il mozzo costituiscono il rotore. Nello schema in figura, attraverso il mozzo le pale spinte dal vento trasmettono il moto all'albero lento che tipicamente gira a velocità comprese tra 20 e 60 giri/minuto.

La navicella /1



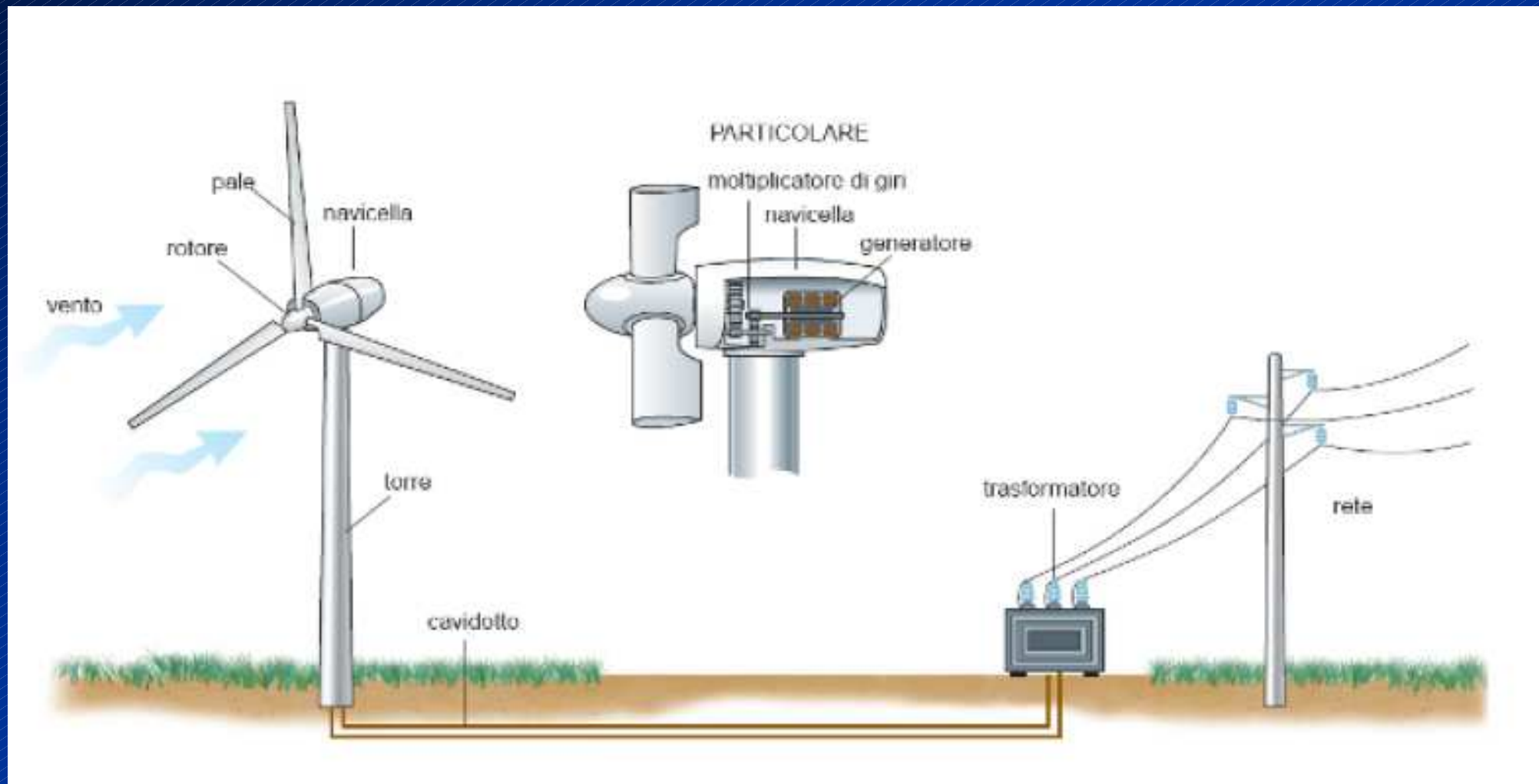
La navicella /2

La navicella o gondola contiene i componenti principali dell'aerogeneratore, li protegge dagli agenti esterni ed è collegata direttamente al rotore.

L'albero di trasmissione lento collega il mozzo al moltiplicatore di giri che serve elevare la velocità di rotazione dell'albero veloce fino agli usuali 1.500 giri/min richiesti dal generatore elettrico. Il gruppo moltiplicatore può raggiungere rapporti di 75:1 che servono quando l'albero lento gira a 20 giri/min.

Tipicamente sono presenti due sistemi di frenaggio, uno idraulico, l'altro meccanico. Il primo è montato sull'albero di trasmissione lento e viene utilizzato durante il normale funzionamento; il secondo è montato sull'albero veloce ed è utilizzato in fase di emergenza o in caso di manutenzione e/o riparazione.

Schema impianto



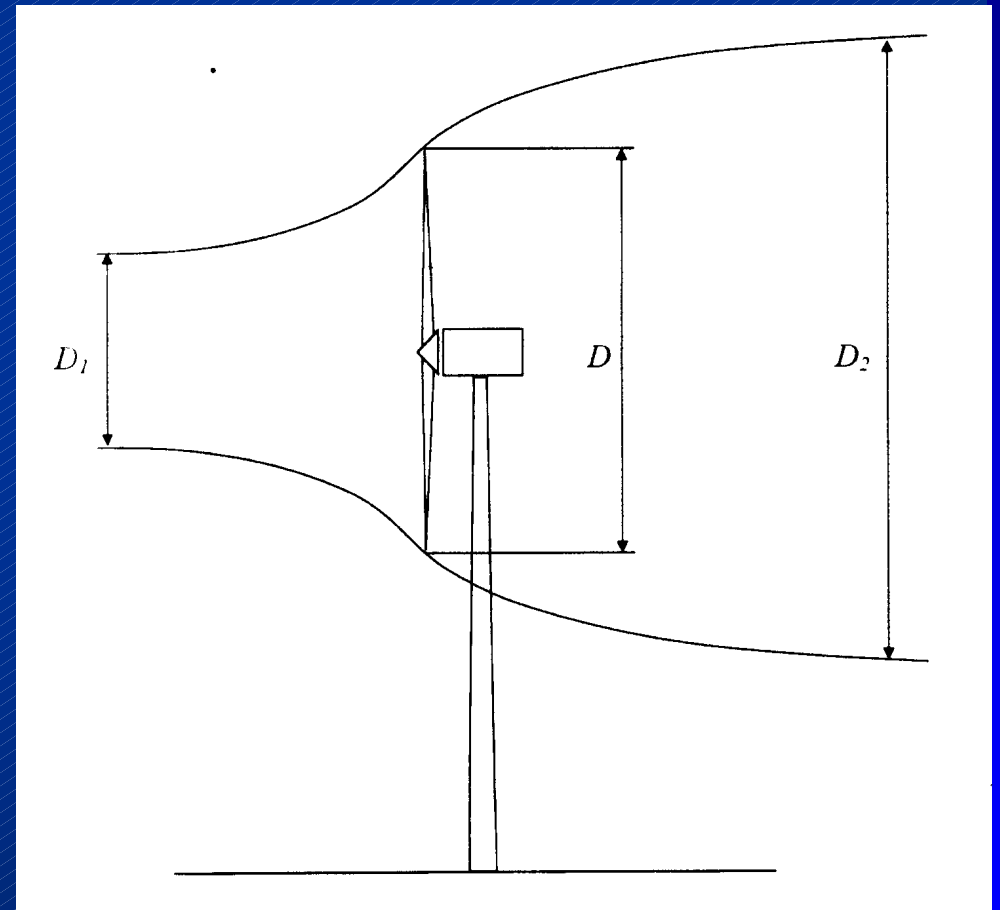
Potenzialità di un aerogeneratore /1

La potenza associata ad un flusso di aria che scorre con velocità w_1 in direzione normale rispetto ad una sezione circolare di diametro D_1 è pari a:

$$P_{ca,1} = \dot{m} w_1^2 / 2 = \rho_1 w_1 \frac{\pi D_1^2}{4} \frac{w_1^2}{2} = \frac{1}{2} \rho_1 w_1^3 S_1$$

dove ρ_1 è la densità dell'aria passante per S_1 .

In ogni caso, la potenza del flusso di aria dipende dal cubo della velocità.



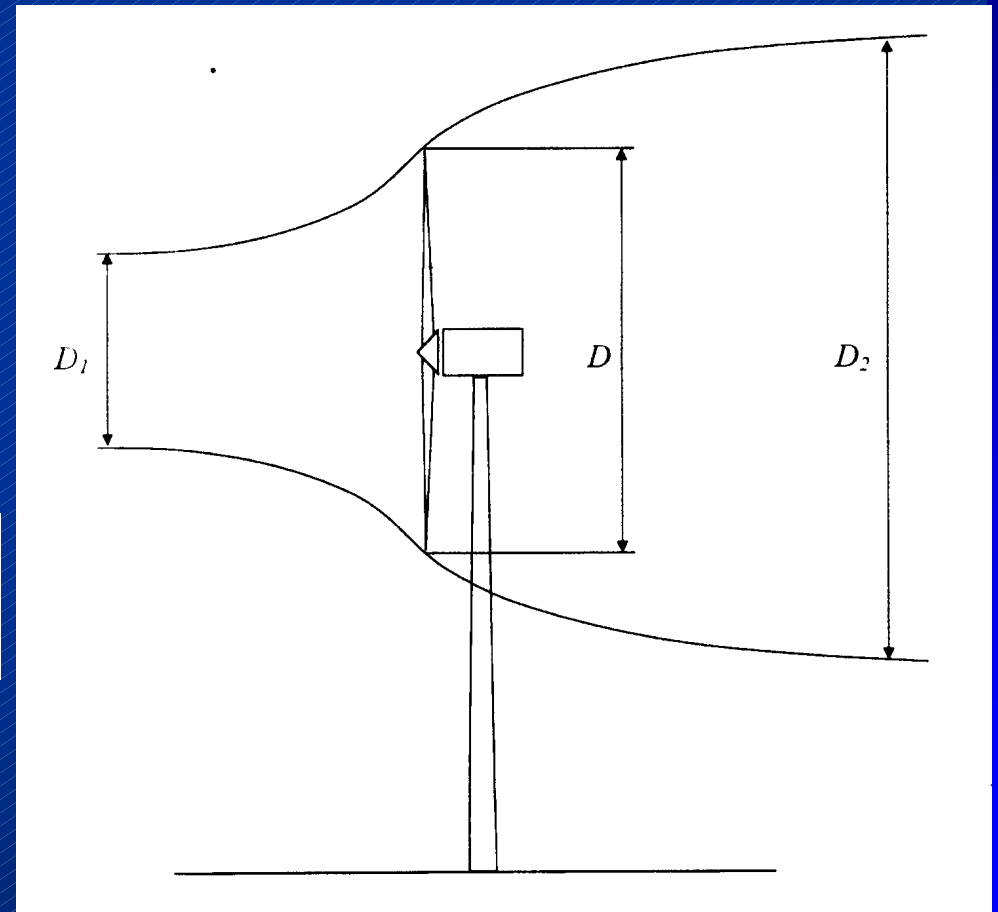
Potenzialità di un aerogeneratore /2

Consideriamo ora il tubo di flusso riportato in figura e tale che le linee più esterne siano sempre parallele alle velocità di flusso periferiche.

La potenza in transito attraverso S_2 è pari a:

$$P_{ca,2} = \dot{m} w_2^2 / 2 = \rho_2 w_2 \frac{\pi D_2^2}{4} \frac{w_2^2}{2} = \frac{1}{2} \rho_2 w_2^3 S_2$$

Nella sezione di uscita, la potenza sarà diminuita in funzione della quantità di moto ceduta al rotore.

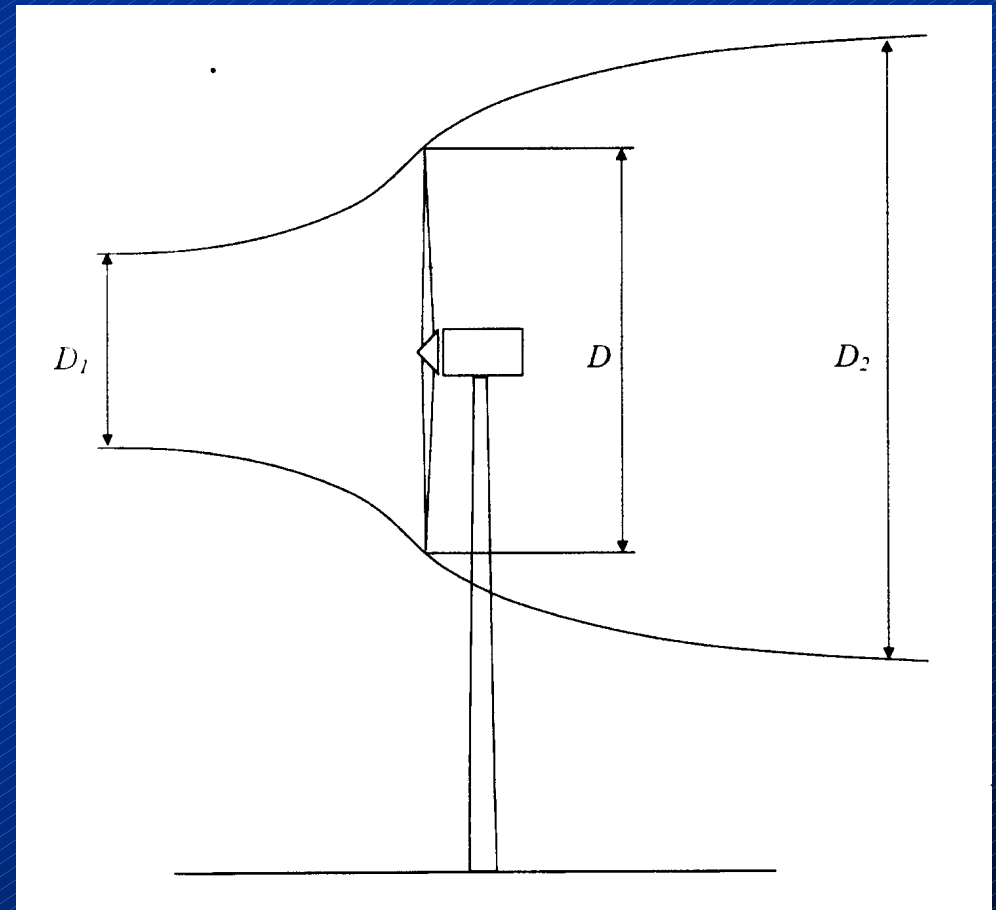


Potenzialità di un aerogeneratore /3

Per come è stato definito il tubo di flusso, in condizioni di vento costante la massa che entra attraverso S_1 è pari alla massa che esce attraverso S_2 , la potenza P ceduta alla rotore è pari a:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (w_1^2 - w_2^2)$$

Subito si deduce che non tutta l'energia cinetica della corrente di aria può essere trasferita al rotore in quanto deve essere $w_2 > 0$ in condizioni di regime.



Il limite di Betz /1

Considerato che con le velocità in gioco l'aria può essere schematizzabile come fluido incomprimibile ($\rho = \rho_1 = \rho_2$), dette S e w l'area spazzata dalla turbina e la relativa velocità di imbocco, si può dimostrare che:

$$w = \frac{w_1 + w_2}{2}$$

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

$$P_{\max} \Rightarrow w_2 = \frac{w_1}{3} = w^*$$

Il limite di Betz /2

Detto C_p il coefficiente di potenza pari a:

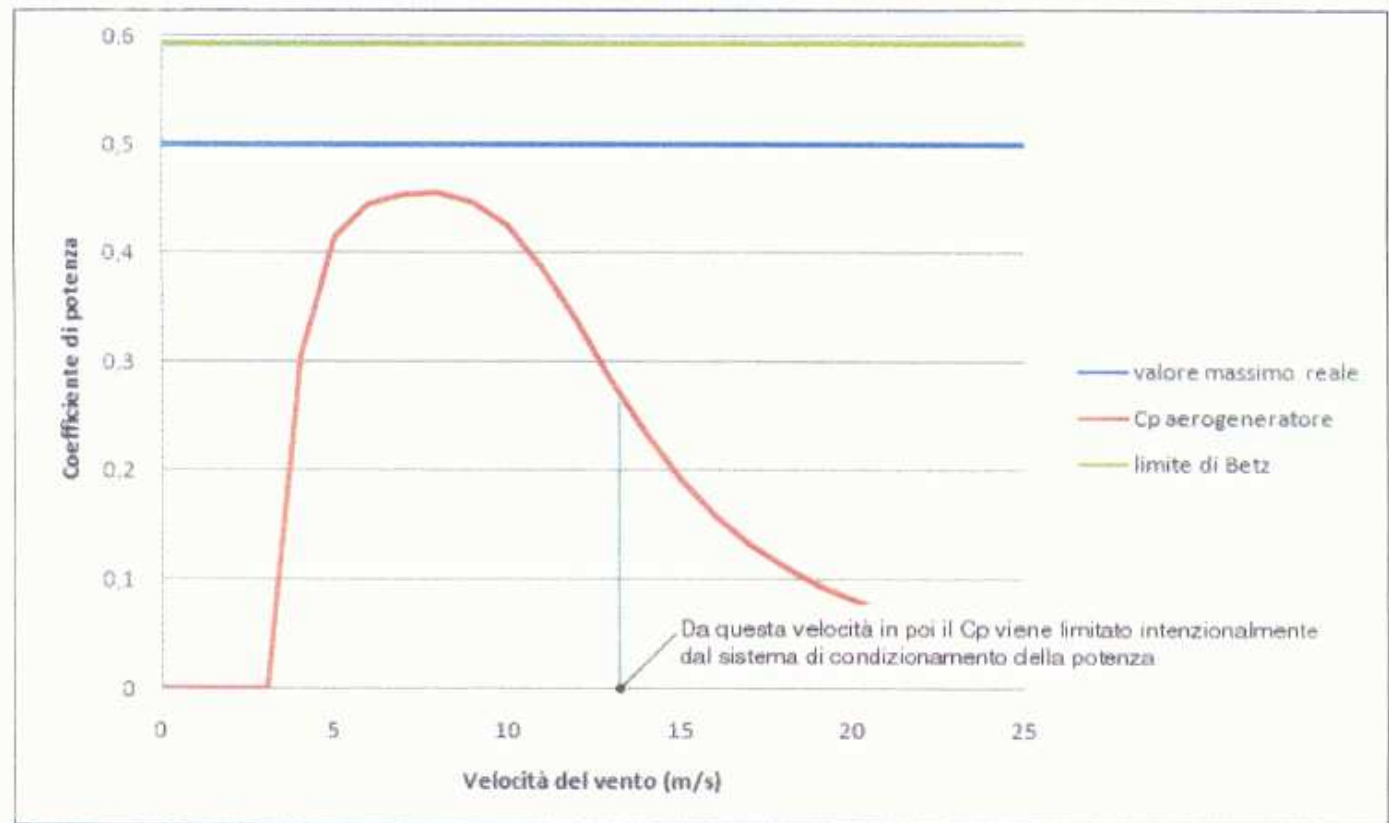
$$C_p = \frac{P}{P_{ca,1}} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho w_1^3 S_1} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho w^3 S}$$

In corrispondenza di $w_2 = w_1/3$, si ottiene il limite di Betz che rappresenta, idealmente, la massima aliquota di potenza cinetica di un flusso indisturbato che può essere convertita in energia meccanica.

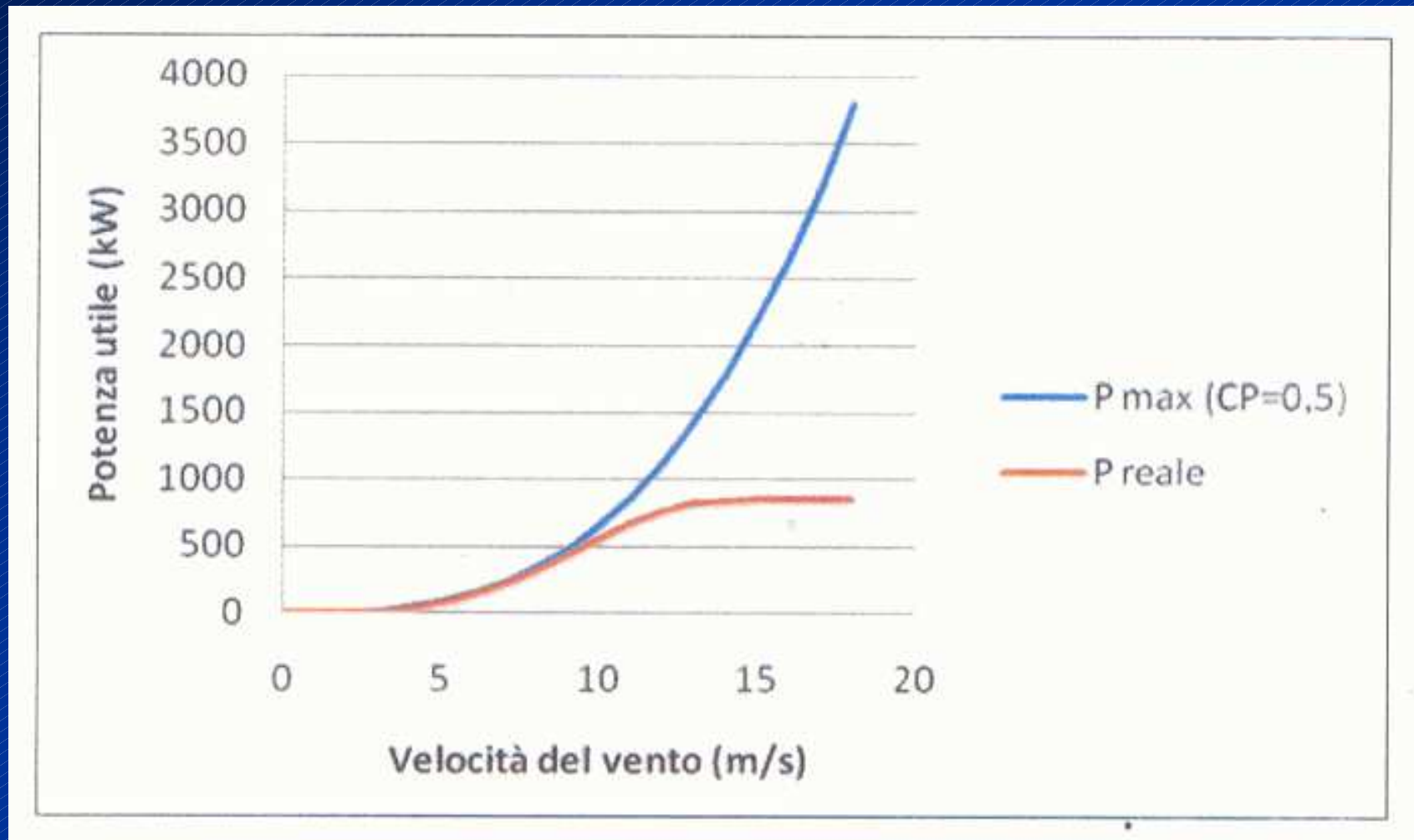
Più in generale, la teoria di Betz dimostra che tale risultato è indipendente dalla configurazione geometrica

Il coefficiente di potenza reale

In condizioni reali si osserva che il coefficiente di potenza può raggiungere valori massimi di circa 0,5 nel caso di aerogeneratori tripala ad asse orizzontale e di circa 0,4 per aerogeneratori ad asse verticale.



La potenza istantanea /1



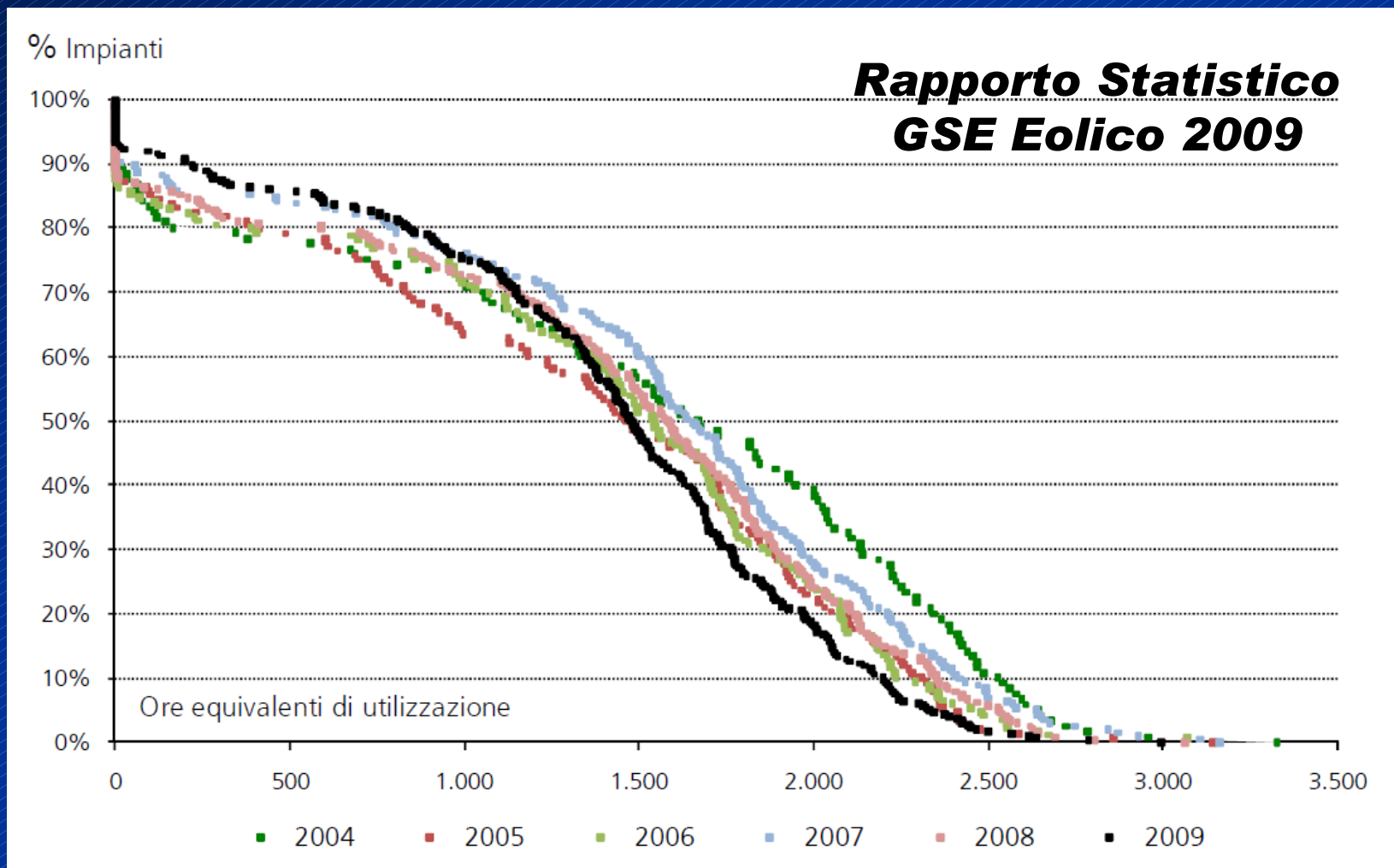
La potenza istantanea /2

La curva in blu raffigura l'andamento della potenza in condizioni di C_p costante. In realtà si tratta di una curva puramente teorica in quanto si potrebbe ottenere solo con un ipotetico rotore in grado di modificare la propria configurazione al fine di mantenere il C_p costantemente al valore massimo.

In condizioni reali, il C_p è ottimizzato per la velocità del sito più probabile e diminuisce se la velocità w differisce da quella nominale. In rosso è riportato l'andamento reale della potenza utile. Si noti che:

- la potenza è limitata superiormente dalla taglia del generatore di energia elettrica;
- esiste una velocità minima (cut-in) al di sotto della quale gli attriti interni degli organi meccanici non consentono produzione utile;
- esiste una velocità massima (cut-out) oltre la quale l'aerogeneratore si disattiva per evitare danni a pale e torre.

Distribuzione percentuale delle ore equivalenti di utilizzazione impianti eolici in Italia nel periodo 2005-2009



**Distribuzione
percentuale
delle ore di
utilizzo
impianti
eolici in Italia
nel 2009
(fonte GSE)**

Nel 2009 il 50% degli impianti hanno avuto un numero di ore equivalenti di utilizzazione maggiori di 1.478 ore.

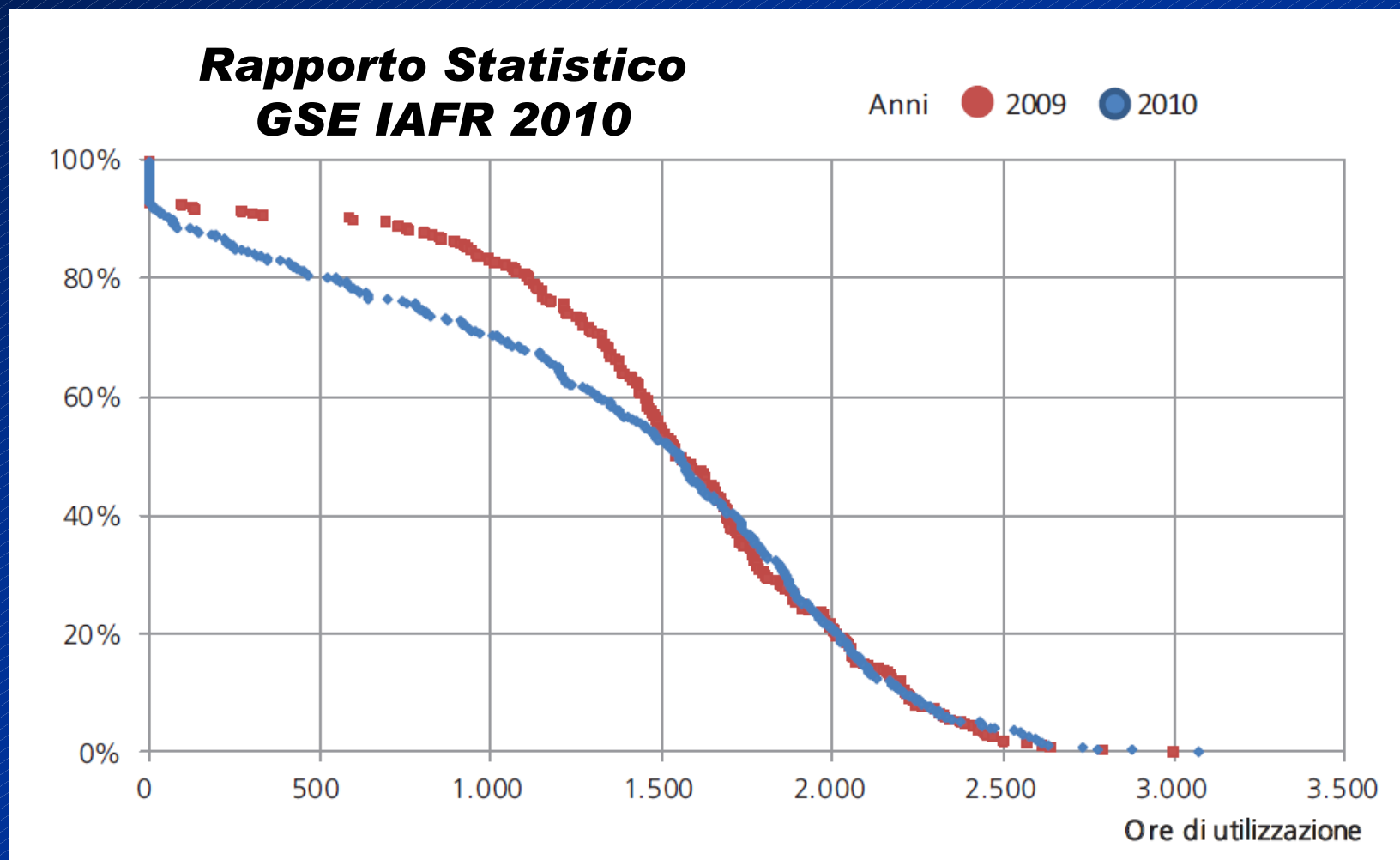
Nel confronto con gli anni precedenti questo valore risulta più basso: nel 2008 infatti si attestava a 1.580 ore, nel 2007 a 1.639.

Il miglior anno continua ad essere il 2004 quando il 50% degli impianti era stato capace di oltre 1.668 ore di utilizzazione annue, quando si era registrata anche la migliore performance assoluta pari a 3.325 ore.

A livello territoriale nel 2009 la Liguria è stata la regione con il massimo delle ore di utilizzazione pari a 1.999 seguita dalla Basilicata con 1.784 ore.

Le regioni più rilevanti, Puglia, Sicilia e Campania, hanno circa 1.400 ore dovute anche al fatto che la loro potenza nell'ultimo anno è cresciuta a tassi intorno al 40%.

Distribuzione percentuale delle ore equivalenti di utilizzazione impianti eolici in Italia nel biennio 2009-2010



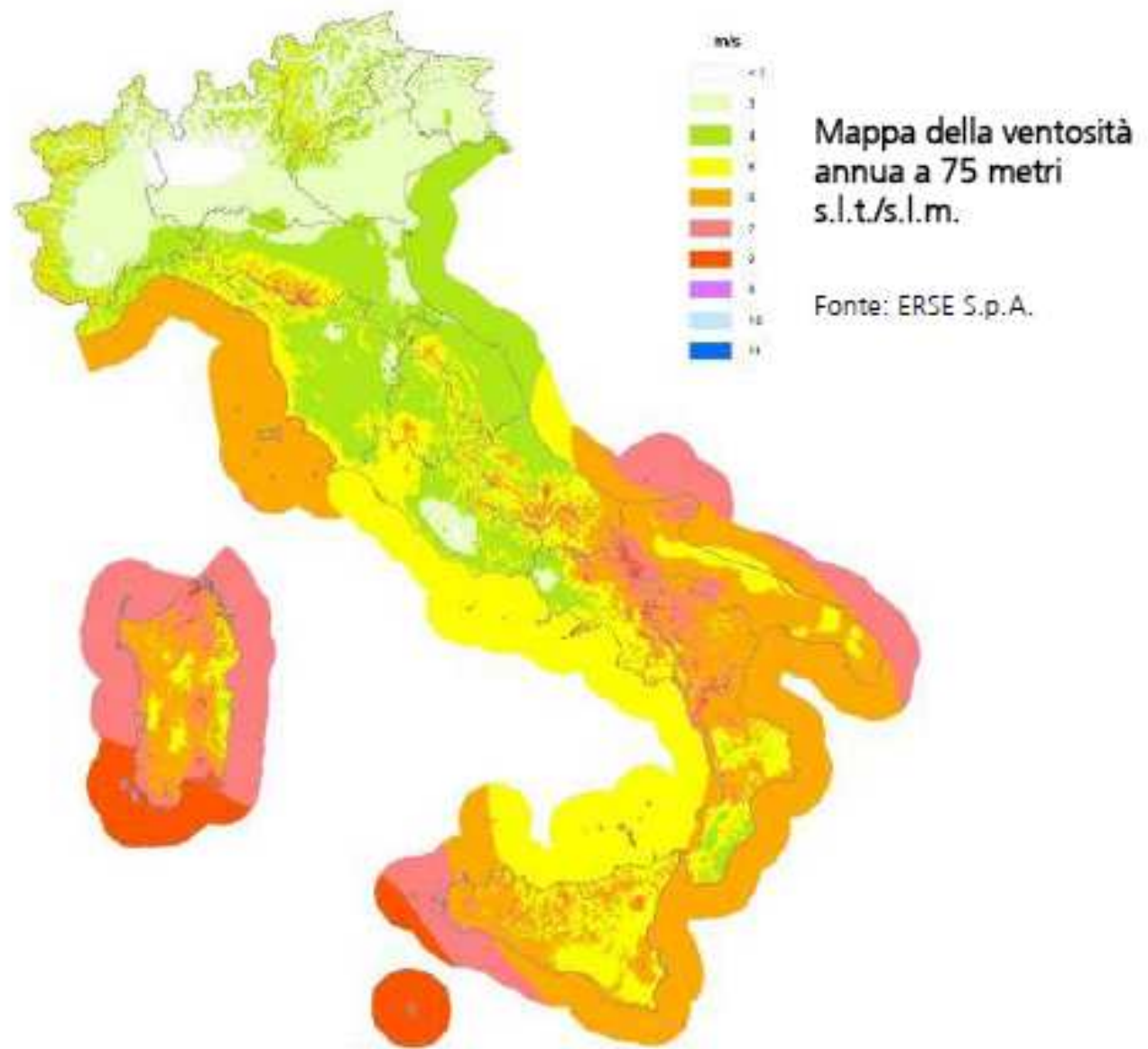
**Distribuzione
percentuale
delle ore di
utilizzo
impianti
eolici in Italia
nel 2010
(fonte GSE)**

Nel 2010 il 50% gli impianti eolici è riuscito a produrre per oltre 1.550 ore, come nel 2009.

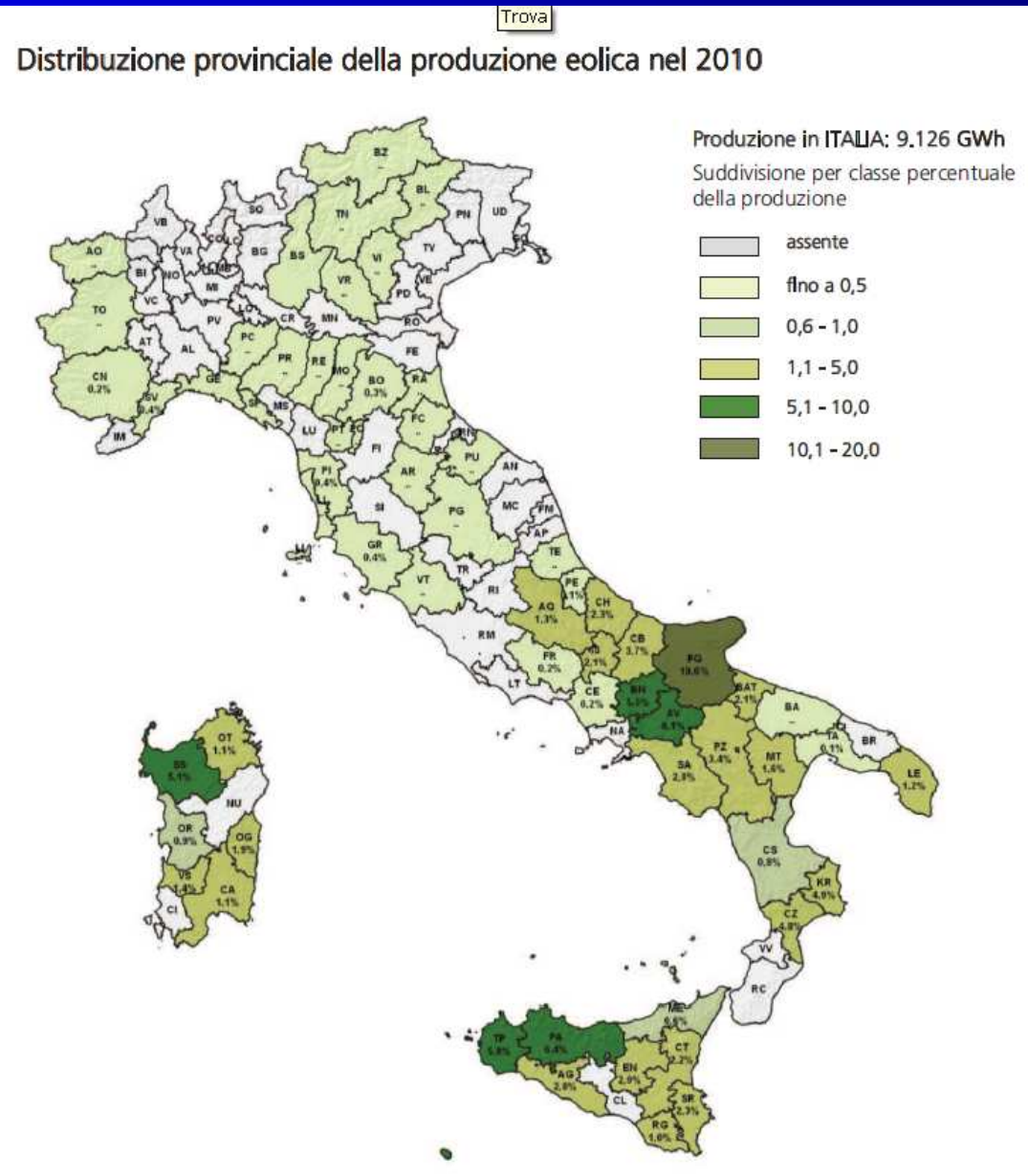
Le ore di utilizzazione dell'intero parco sono pari nel 2010 a 1.748 rispetto alle 1.573 del 2009. L'incremento è dovuto alla differente distribuzione degli impianti, mentre nel 2010 molti sono concentrati intorno alle 1.500 ore, nel 2009 erano distribuiti più eterogeneamente. Il comportamento degli impianti con le ore di utilizzazione più alte è invece molto simile.

Per migliorare la significatività dell'indicatore, non sono stati considerati i nuovi impianti ossia quelli entrati in esercizio nel corso dell'anno. Infatti la quantità di elettricità da loro prodotta è riferita ad un periodo di tempo inferiore all'anno e le loro ore di utilizzazione non sono rappresentative della reale potenziale produttività degli impianti eolici. Se si volessero considerare anche gli impianti entrati in esercizio nel corso dell'anno, le ore si ridurrebbero a 1.570 per il 2010 e a 1.336 per il 2009.

**Il vento, una
risorsa non
uniformemente
distribuita**



**Il vento, una
risorsa non
uniformemente
distribuita
(dal Rapporto
Statistico GSE
IAFR 2010)**



Il sistema di incentivi

Il D.Lgs 387/03, stabilisce che la produzione elettrica da fonte eolica rientri tra le produzioni da fonte rinnovabili e, pertanto, può usufruire delle seguenti incentivazioni:

- certificati verdi (CV)
- tariffa onincomprensiva (TO)

I certificati verdi

I certificati verdi hanno un valore unitario pari a 1 MWh e sono emessi dal GSE in numero pari al prodotto della produzione netta di energia incentivabile per i coefficienti, differenziati per fonte, riportati nella tabella 2 della Legge 244/07 (alias Finanziaria 2008). Nel caso dell'eolico, tale coefficiente è pari a 1, ma è elevato a 1,5 per gli impianti off-shore.

Il prezzo dei certificati si forma sul mercato in base alla legge della domanda e dell'offerta. Più precisamente, i CV sono collocati sul mercato ad un prezzo, riferito al singolo MWh di EE, pari alla differenza tra 180 euro/MWh ed il valore medio annuo del prezzo di cessione dell'EE definito dall'AEEG in attuazione del D.Lgs. 387/03, art. 13, comma 3.

Obblighi di produzione da FR

Anno	Quota dell'obbligo
2007	3,80%
2008	4,55%
2009	5,30%
2010	6,05%
2011	6,8%
2012	7,55%

La tariffa onnicomprensiva

A decorrere dal 01/01/2008, in alternativa al riconoscimento dei CV, gli impianti eolici di potenza ≤ 200 kW possono accedere al sistema tariffario onnicomprensivo (STO). In tal caso, è riconosciuta una tariffa di 0,3 euro/kWh per un periodo di 15 anni.

La TO comprende sia il valore dell'incentivo che il ricavo per la vendita dell'EE prodotta. Inoltre, la TO spetta *"esclusivamente in riferimento a misure a consuntivo dell'energia elettrica immessa in rete"*.

La tariffa onnicomprensiva conviene? /1

Gli impianti eolici hanno un costo di installazione che è fortemente variabile: è abbastanza intuitivo che la realizzazione di un impianto di tipo off-shore connesso in rete è molto più costoso rispetto ad un impianto in terra vicino ad una cabina di trasformazione.

Inoltre, per gli impianti di elevata taglia si generano consistenti economie di scala che possono far scendere considerevolmente il costo unitario di installazione.

In generale, si può assumere che un impianto eolico possa costare tra i 1.000 ed i 3.000 euro/kW.

La tariffa onnicomprensiva conviene? /2

Le ore di utilizzazione di un impianto eolico possono variare considerevolmente in funzione della localizzazione dell'impianto.

Inoltre, occorre considerare che "in Italia, nel 2008, gli impianti eolici hanno generato meno energia rispetto a quanto avrebbero potuto produrre a causa di limitazioni sulla capacità di trasporto della rete di trasmissione che hanno, nei periodi ad alta ventosità, impedito il funzionamento degli impianti a carichi eccedenti il 30%-40% del valore nominale" (dal rapporto 2008 del GSE circa l'eolico).

La tariffa onnicomprensiva conviene? /3

Assumendo un fattore di utilizzazione di 1.500 h/anno, ogni singolo kW di potenza eolica installata potrebbe costare da 1.000 a 3.000 euro e rendere circa 450 euro/anno in regime di STO.

In questa ipotesi, il tempo di ritorno dell'investimento è compreso tra 2 e 7 anni e deve essere confrontato con una vita dell'impianto di circa 15 anni. Tutto sommato si tratta di un investimento abbastanza conveniente anche nel caso di impianti costosi e caratterizzati da bassi fattori di utilizzazione.