

PARCO EOLICO CARPINACCIO

L'ENERGIA EOLICA

Le turbine eoliche trasformano l'energia cinetica posseduta dal vento in energia meccanica di rotazione e quindi in energia elettrica.

L'energia cinetica E_c posseduta da una massa d'aria m ($m = \rho \cdot q \cdot X \cdot t$, ove q indica la portata d'aria) che si muove ad una velocità v costante è data da:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot q \cdot t \cdot v^2$$

La potenza disponibile nella massa d'aria, ovvero l'energia nell'unità di tempo, è data da:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot q \cdot v^3$$

Indicando con ρ la densità dell'aria e con A la sezione del tubo di flusso considerato, la portata q può essere espressa come:

$$q = (\rho \cdot A \cdot v)^t$$

Quindi la potenza disponibile è data da:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

La potenza è pertanto funzione del cubo della velocità.

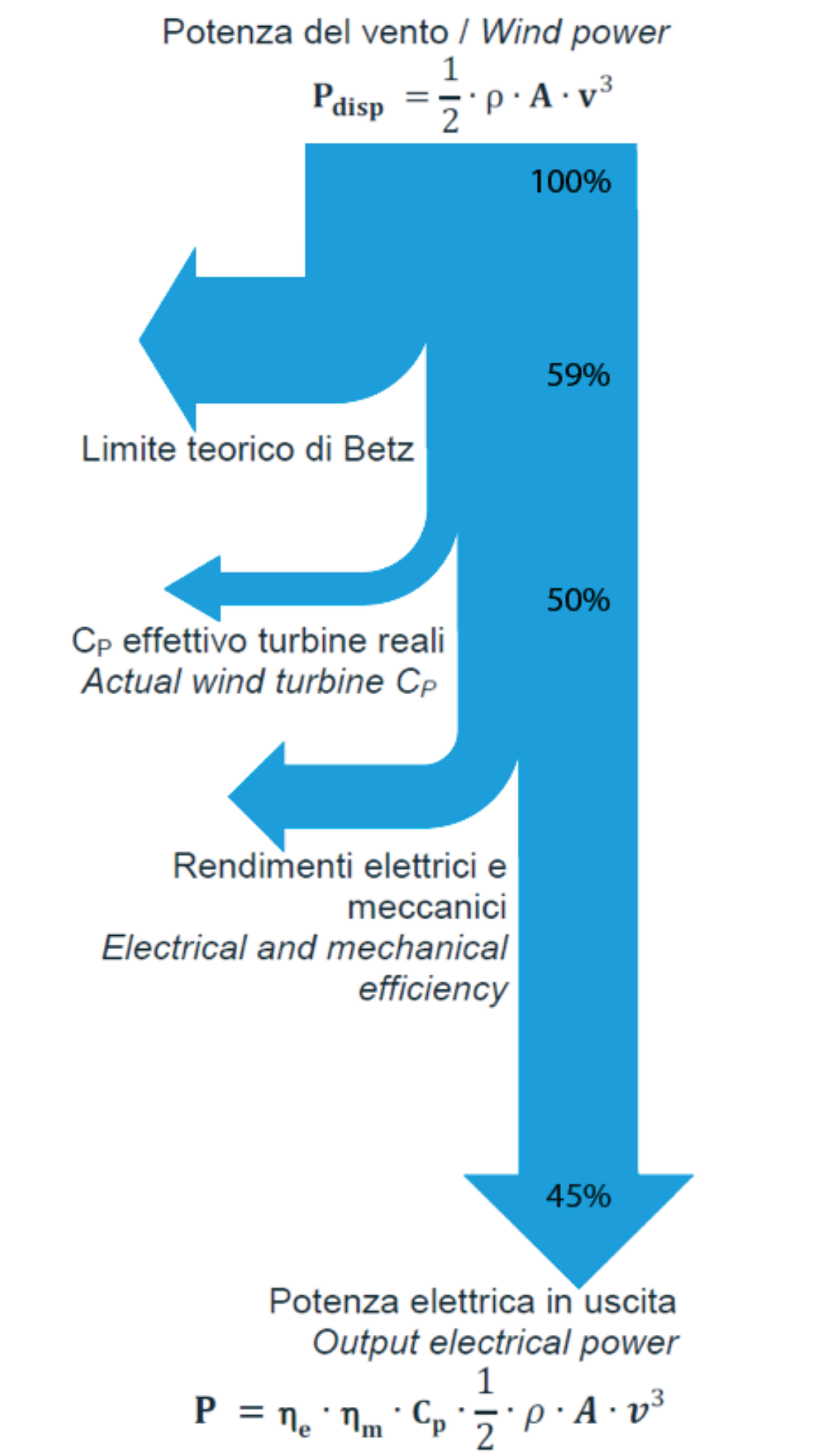
Un aerogeneratore riesce a sfruttare tutta questa potenza? No, esiste un limite teorico definito dal Limite di Betz. La massima potenza che si può estrarre in via teorica da una corrente d'aria con un aerogeneratore ideale non può superare il 59% della potenza disponibile nel vento incidente

$$C_{p,MAX} = \frac{P}{P_{disp}} = \frac{16}{27} = 59\%$$

Le turbine moderne riescono a raggiungere valori di C_p (coefficiente di potenza) prossimi a 0,5, non lontani dal limite teorico di Betz.

$$P = \eta_e \cdot \eta_m \cdot C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

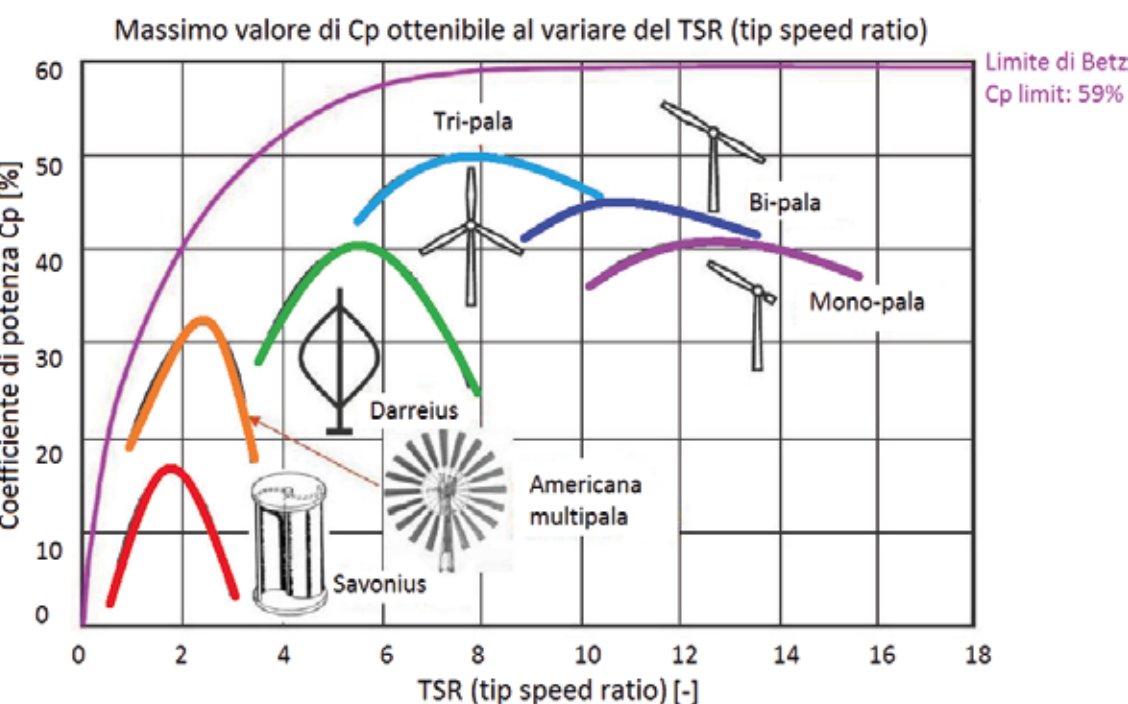
Indicati con η_e e il rendimento del generatore elettrico e con η_m il rendimento meccanico complessivo (albero e moltiplicatore di giri), la potenza elettrica generata, estratta dall'energia cinetica del vento, è data da:



Perché si usano aerogeneratori tripala?

Perché consentono di ottenere i coefficienti di potenza C_p più elevati.

Questo parametro (C_p) dipende dal tipo di turbina, dalla geometria delle pale e dalla velocità del vento. Fissati i parametri geometrici, il coefficiente di potenza dipende soltanto dal TSR (*Tip Speed Ratio*), definito come rapporto fra la velocità tangenziale del rotore della turbina e la velocità del vento:



COME INTERAGISCE IL VENTO CON LE PALE DI UN AEROGENERATORE?

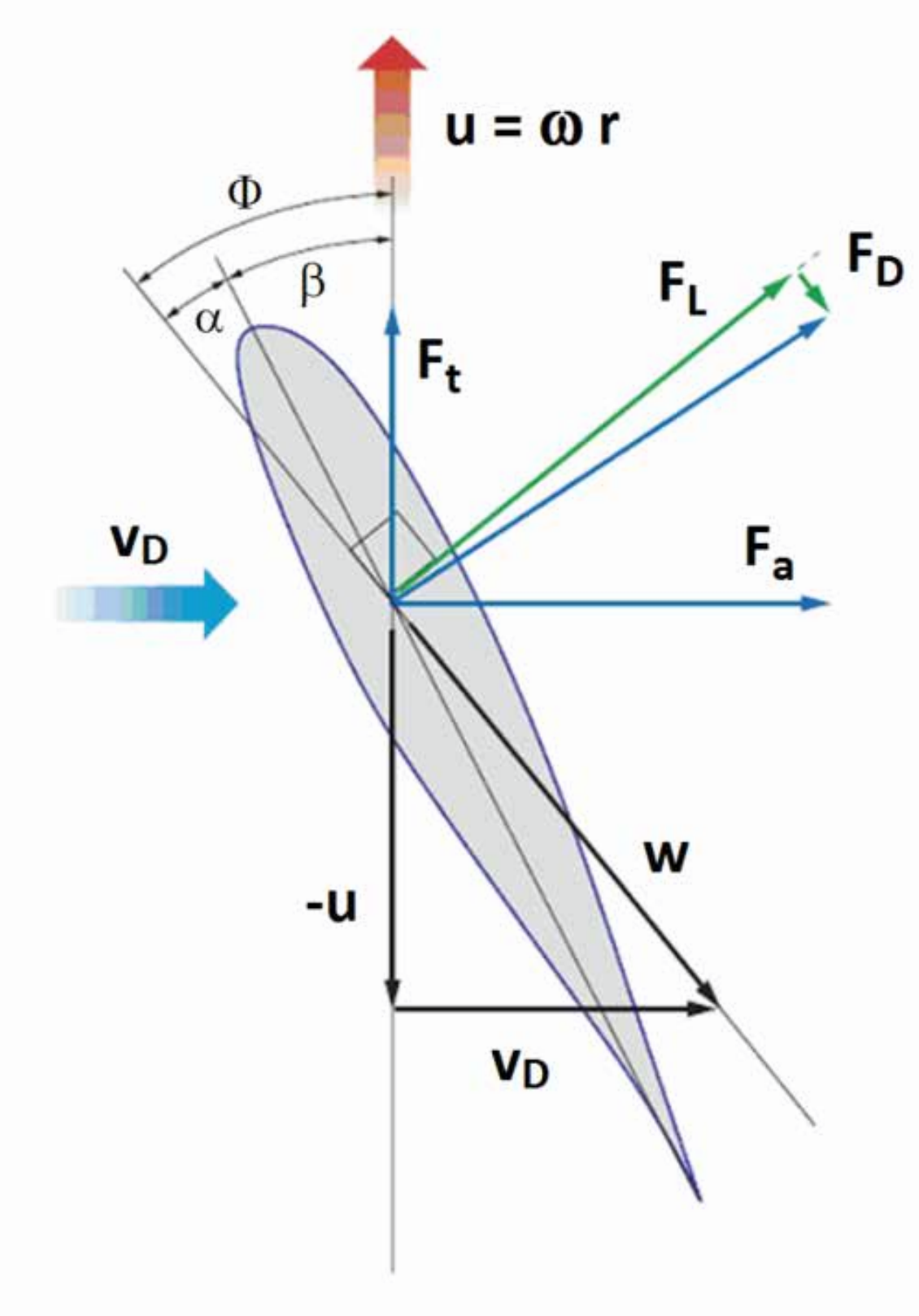
Forze di portanza e di resistenza.

Portanza F_L , perpendicolare alla direzione del flusso d'aria risultante (velocità relativa rispetto alla pala), determinata dal gradiente di pressione che si crea per effetto del profilo alare.

Resistenza F_D , parallela alla direzione del flusso d'aria risultante

Nella pale eoliche ad asse orizzontale la rotazione e quindi la produzione di energia è essenzialmente dovuta alla portanza (come per l'ala di un aereo)

α : angolo di incidenza
 β : angolo di calettamento o pitch
 ϕ = α + β : angolo tra le velocità relative w e la velocità di rotazione u



La pala ha uno sviluppo radiale, e quindi la velocità periferica u varia con il raggio, e di conseguenza varia l'angolo α (diminuisce all'aumentare del raggio)

Per garantire angoli di incidenza ottimali su tutta la lunghezza, le pale devono essere svergolate (al crescere di r diminuisce l'angolo di calettamento β).

Ottimizzazione rendimento e C_p

Al variare della velocità del vento, varia l'angolo α ; per mantenere l'angolo di incidenza prossimo al valore ottimale, quello cioè che massimizza l'efficienza di conversione, ci sono due possibilità di regolazione:

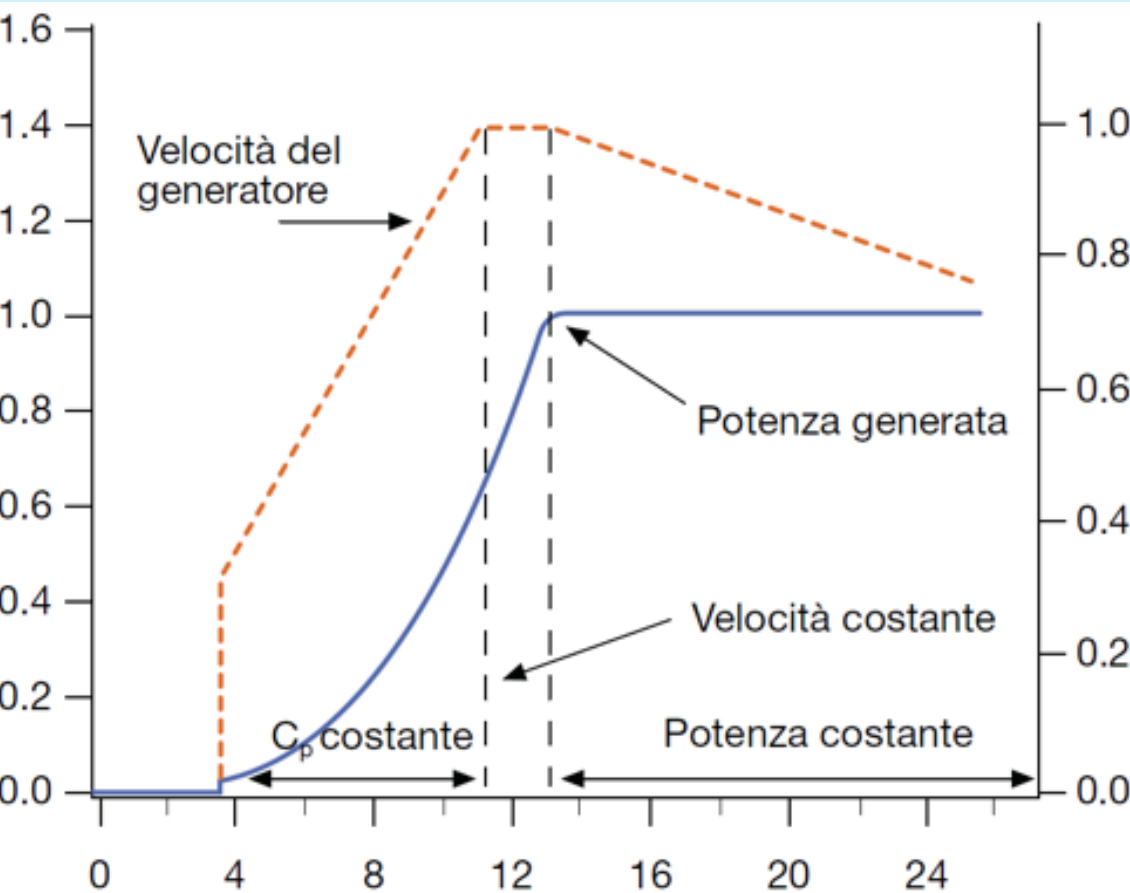
1) **Regolazione di velocità:** la velocità di rotazione delle pale viene continuamente adattata alla velocità del vento, mantenendo costante il TSR al valore ottimale. Questo è possibile grazie alla presenza di generatori sincroni o asincroni connessi alla rete tramite un convertitore di potenza che controlla la velocità del rotore.

2) **Regolazione dell'angolo di pitch:** ogni singola pala può essere ruotata attorno al suo asse (angolo β) in corrispondenza dell'innesto con l'hub, con lo scopo di mantenere l'angolo di incidenza costante al variare di α .

Per velocità del vento moderate, queste turbine funzionano usualmente a Pitch costante con velocità variabile del rotore, attraverso il controllo della coppia, per mantenere il TSR al valore ottimale.

All'aumentare della velocità del vento, il rotore raggiunge generalmente la sua velocità nominale prima che sia raggiunta la potenza nominale, pertanto la velocità di rotazione deve essere mantenuta costante.

Quando viene raggiunta la potenza nominale, l'azione combinata sulla coppia del generatore e sull'angolo di Pitch viene utilizzata per controllare sia la potenza in uscita mantenendola al valore nominale P_n , sia per controllare la velocità del rotore e mantenerla entro limiti accettabile nell'intorno della velocità nominale

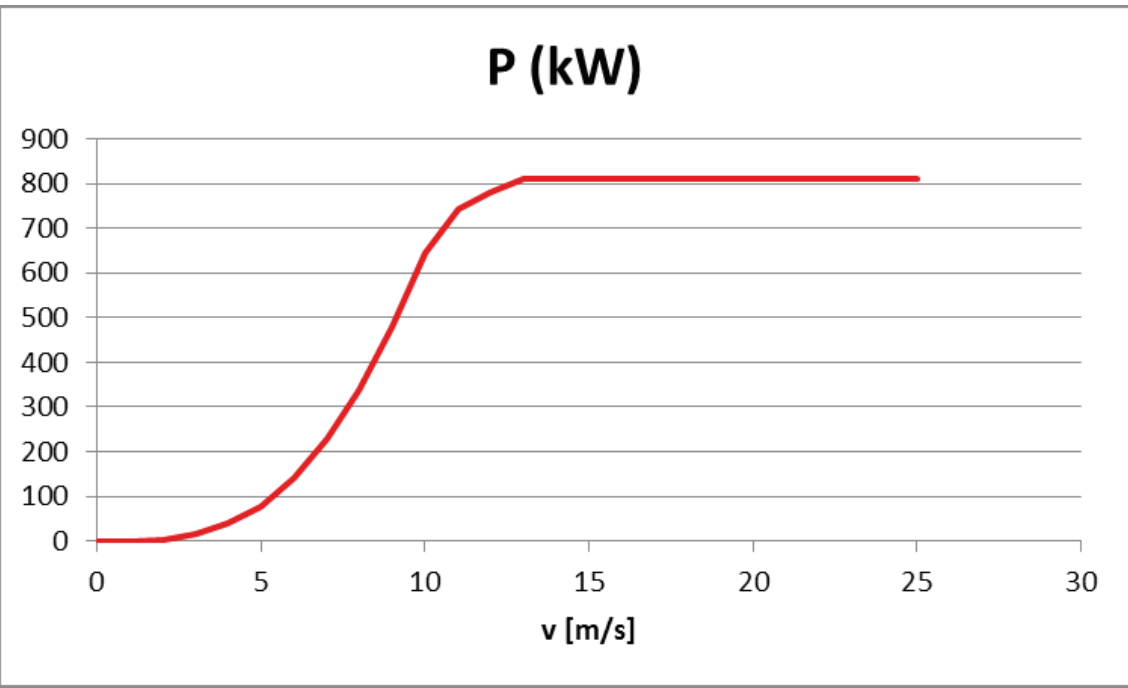


CURVA DI POTENZA DEGLI AEROGENERATORI

Cut-in: velocità del vento alla quale la macchina comincia a funzionare, in pratica la minima velocità alla quale la macchina produce potenza (molto poco, perché è basso il contenuto energetico, che varia con il cubo della velocità).

Rated: velocità del vento nominale, a cui la macchina produce la potenza di targa. Al di sopra di essa entrano in funzione meccanismi di limitazione della potenza (pitch control).

Cut-off: velocità del vento alla quale la turbina cessa di produrre e viene tenuta frenata per ragioni di sicurezza, al fine di evitare carichi eccessivi sulle strutture e sui vari organi meccanici.



MICRO-SITING: STIMA DELLA PRODUCIBILITÀ ENERGETICA DI UN IMPIANTO

CAMPAGNA DI MISURE ANEMOMETRICHE

Per stimare la producibilità di un sito è necessario una campagna di misurazione accurata e prolungata nel tempo.

Non è sufficiente conoscere la velocità media del vento in un determinato sito (l'energia prodotta va con il cubo della velocità) Fondamentale è avere a disposizione dei dati che riportino, per un determinato periodo (es. 1 anno), l'istogramma della durata percentuale delle diverse velocità del vento

Distribuzione di Weibull



MICRO-SITING

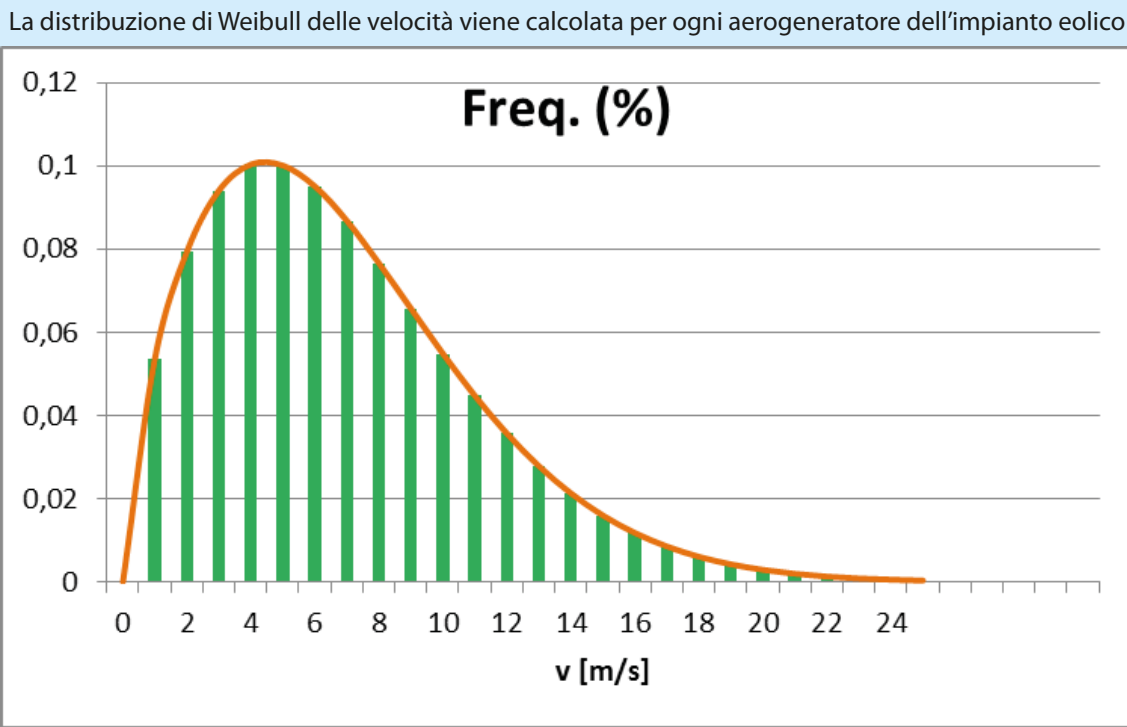
Attraverso l'ausilio di software specialistici di modellazione numerica, sulla base dei dati misurati, è possibile determinare la velocità del vento all'effettiva altezza del mozzo delle turbine che verranno installate.

La ventosità varia con l'altezza per effetto di:

- Caratteristiche orografiche
- Scabrezza del suolo
- Eventuale presenza di ostacoli

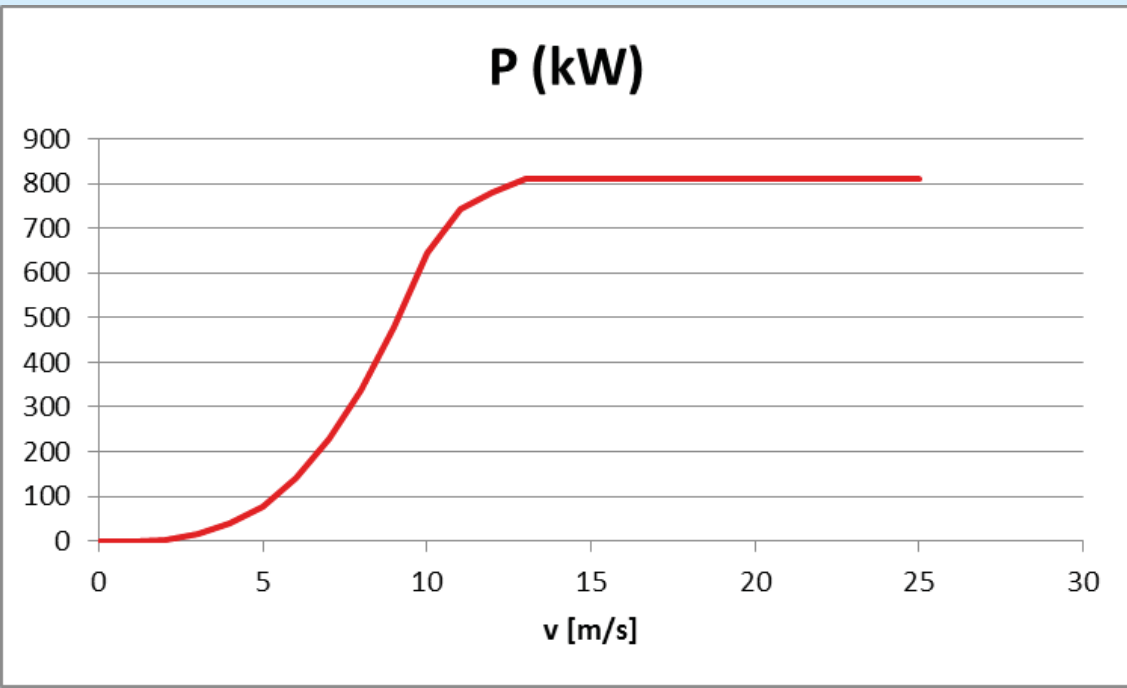


La produzione di energia si ottiene “moltiplicando” la curva di potenza per la distribuzione in frequenza del vento:



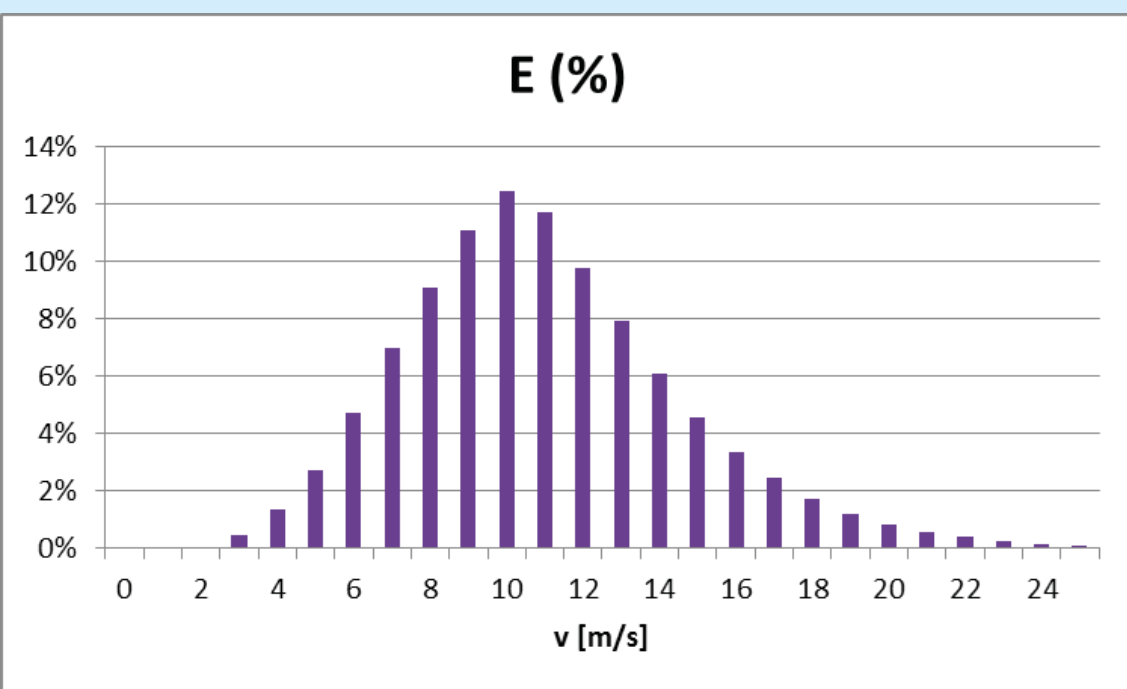
X

La curva di potenza delle turbine

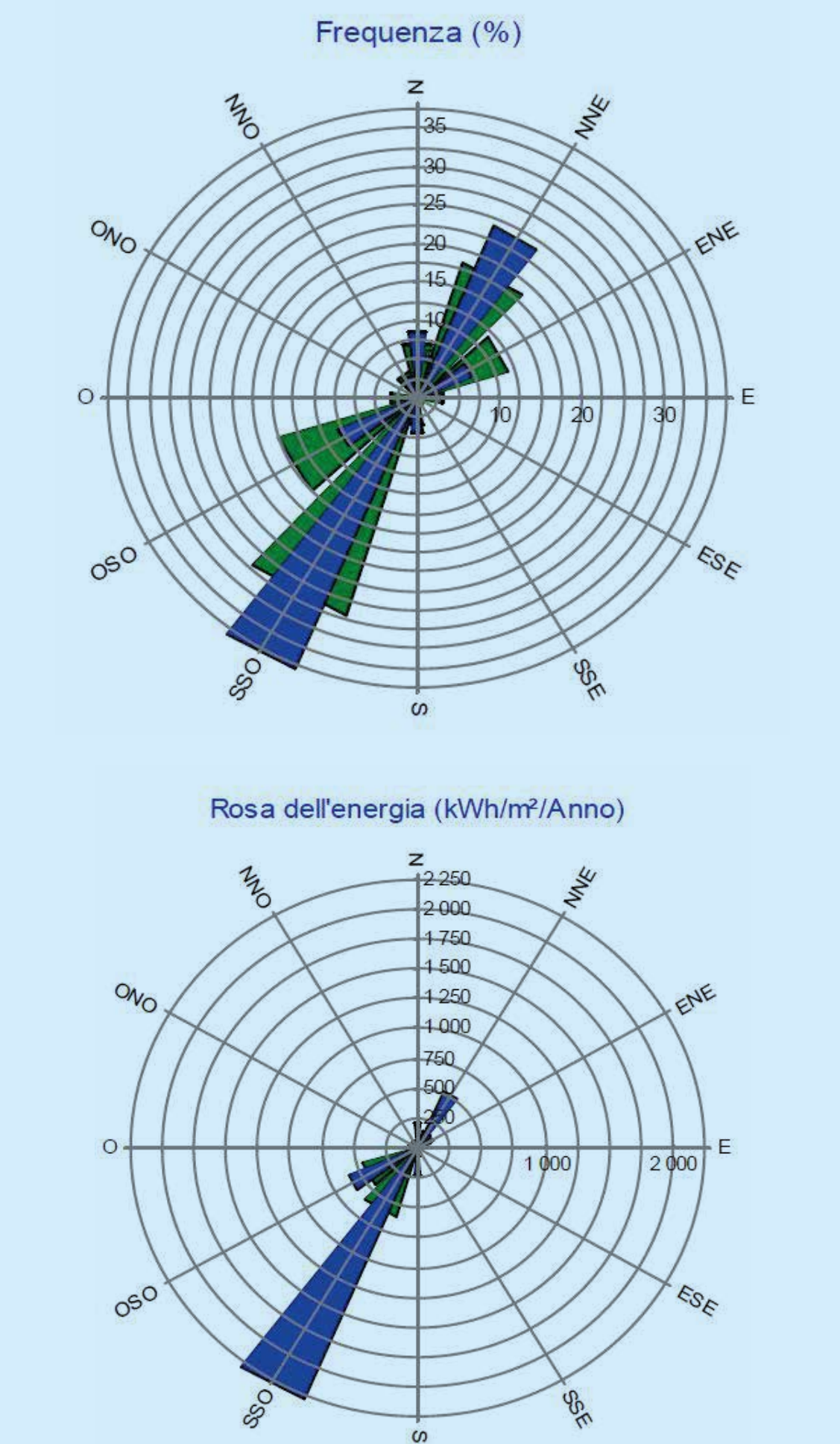
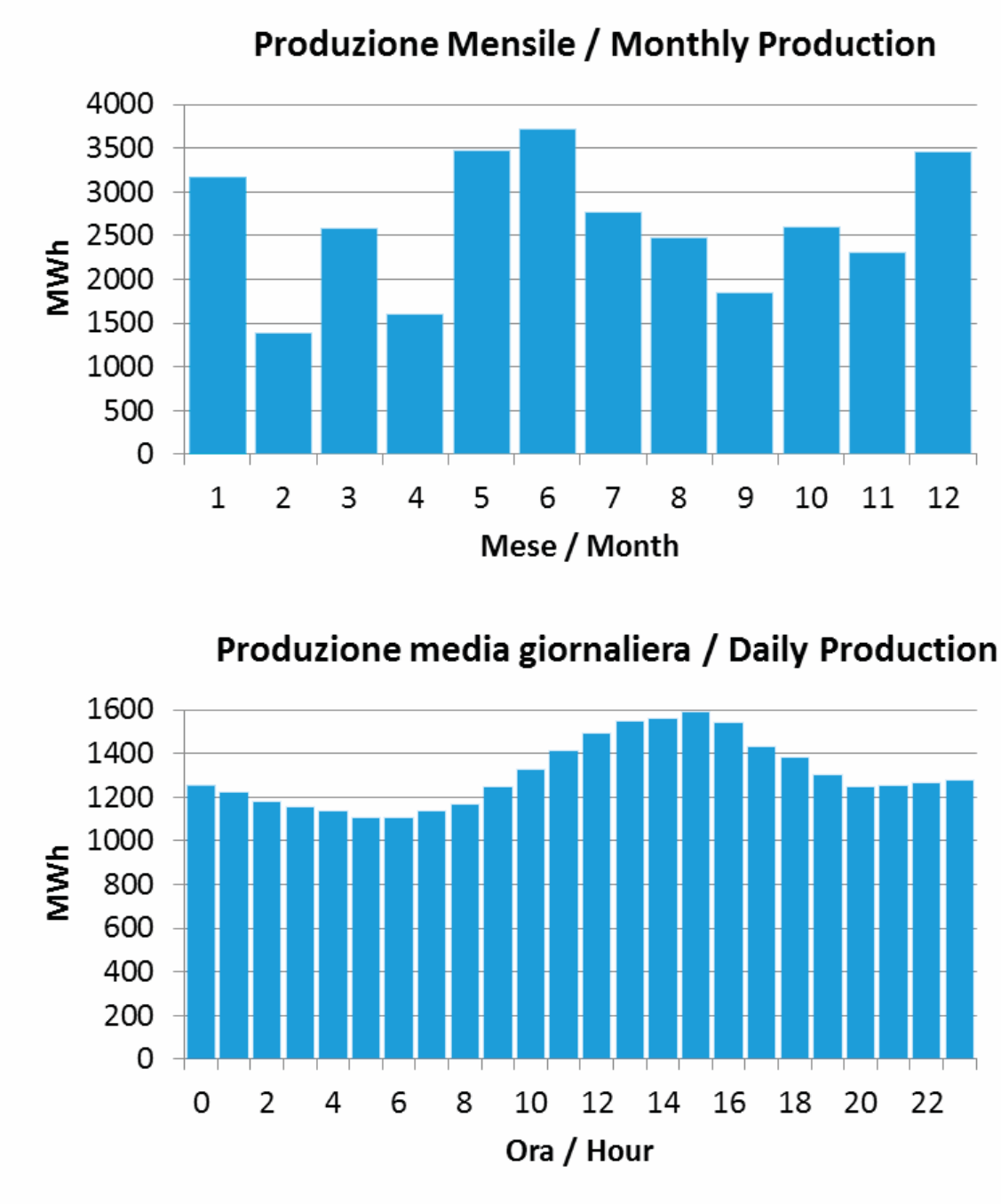


=

Il contenuto energetico del vento alle basse velocità è molto modesto.



CARATTERISTICHE DEL SITO DI CARPINACCIO



Rosa dei venti e dell'energia: la produzione dell'impianto di Carpinaccio è quasi per intero determinata dal vento che spira da SSO.