

LA TURBINA EOLICA I SUOI COMPONENTI E IL COLLEGAMENTO ALLA RETE

1 Pale

Simili alle ali degli aerei, raccolgono il vento e trasformano l'energia cinetica in un moto rotatorio con una velocità di rotazione tra **10 giri/min e 25 giri/min**

3 Rotore

È la parte della turbina eolica costituita da un mozzo al quale sono fissate le pale

Diametro di **90 - 150 m**

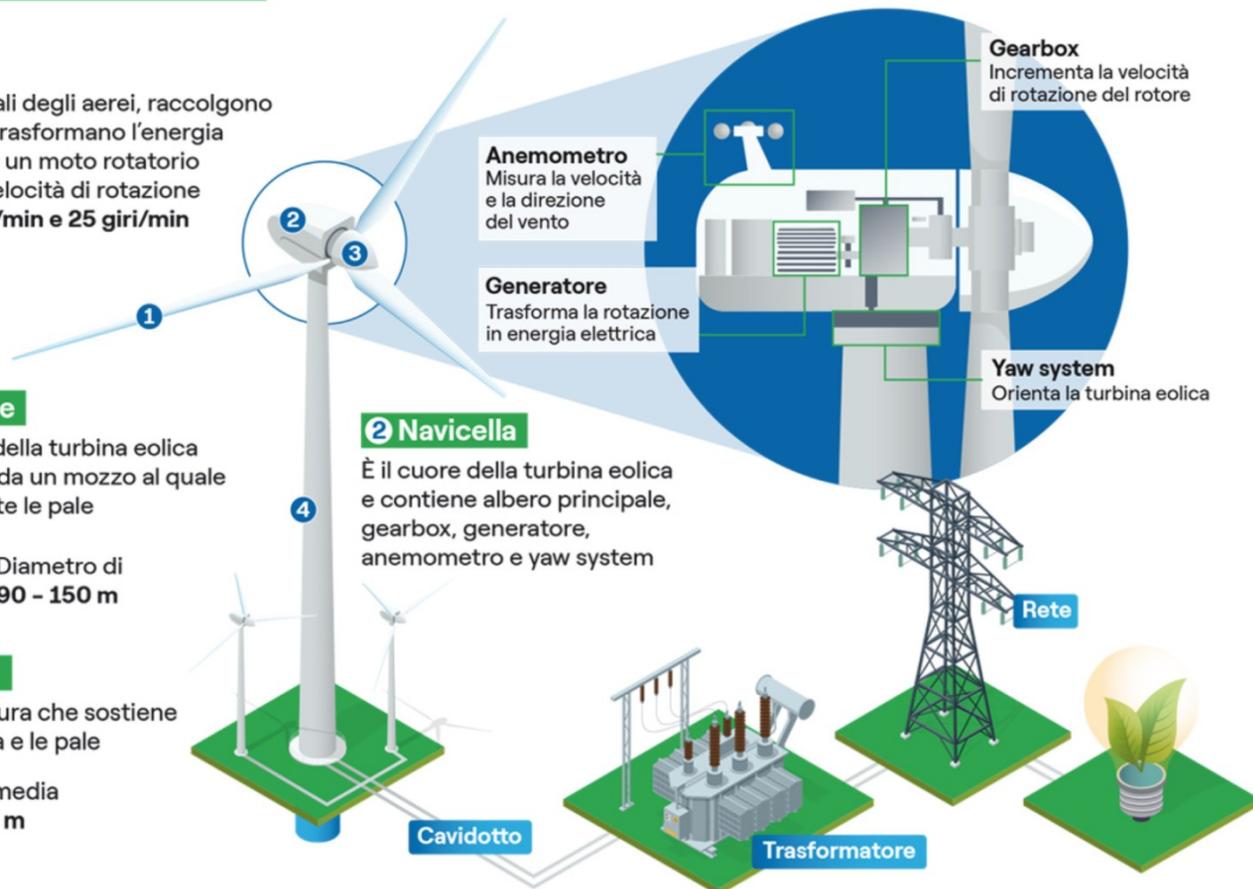
4 Torre

Una struttura che sostiene la navicella e le pale

Altezza media **80 - 115 m**

2 Navicella

È il cuore della turbina eolica e contiene albero principale, gearbox, generatore, anemometro e yaw system



Rotore

Il rotore è parte della turbina eolica che converte l'energia del vento in energia di rotazione. È costituito da due o tre pale che hanno la forma di profili alari. Quando soffia il vento, le pale girano attorno a un mozzo centrale, collegato al generatore.

Generatore

Il generatore è una parte della turbina eolica che converte l'energia rotazionale del rotore in energia elettrica. Funziona utilizzando l'induzione elettromagnetica per produrre una corrente elettrica.

Controllo del passo

Il controllo del passo è un sistema che regola l'angolo delle pale per controllare la velocità del rotore. Quando la velocità del vento aumenta, le pale vengono girate in modo da generare meno portanza, rallentando il rotore. Quando la velocità del vento diminuisce, le pale vengono girate in modo da generare più portanza, che accelera il rotore.

Controllo dell'imbardata

Il controllo dell'imbardata è un sistema che regola l'orientamento del rotore in modo che sia rivolto verso il vento. Utilizza un sensore e un motore per ruotare il gruppo gondola e rotore nella posizione corretta.

Velocità di cut-in

La velocità di cut-in è la velocità del vento alla quale la turbina eolica inizia a generare elettricità. Questa velocità è generalmente di circa 3-4 m/s (7-9 mph).

Velocità di cut-off (disinserimento)

La velocità di disinserimento è la velocità del vento alla quale la turbina eolica smette di generare elettricità per proteggersi dai danni. Questa velocità è tipicamente di circa 25 m/s (56 mph).

Fattore di capacità

Il fattore di capacità è il rapporto tra l'energia effettiva prodotta da una turbina eolica in un periodo di tempo e l'energia massima che avrebbe potuto produrre se avesse funzionato a piena capacità per lo stesso periodo. È una misura dell'efficienza con cui viene utilizzata la turbina eolica.

Parco eolico

Un parco eolico è un gruppo di turbine eoliche ubicate nella stessa area e collegate alla stessa rete elettrica. I parchi eolici sono generalmente costruiti in aree con velocità del vento elevate, come regioni costiere o passi di montagna.

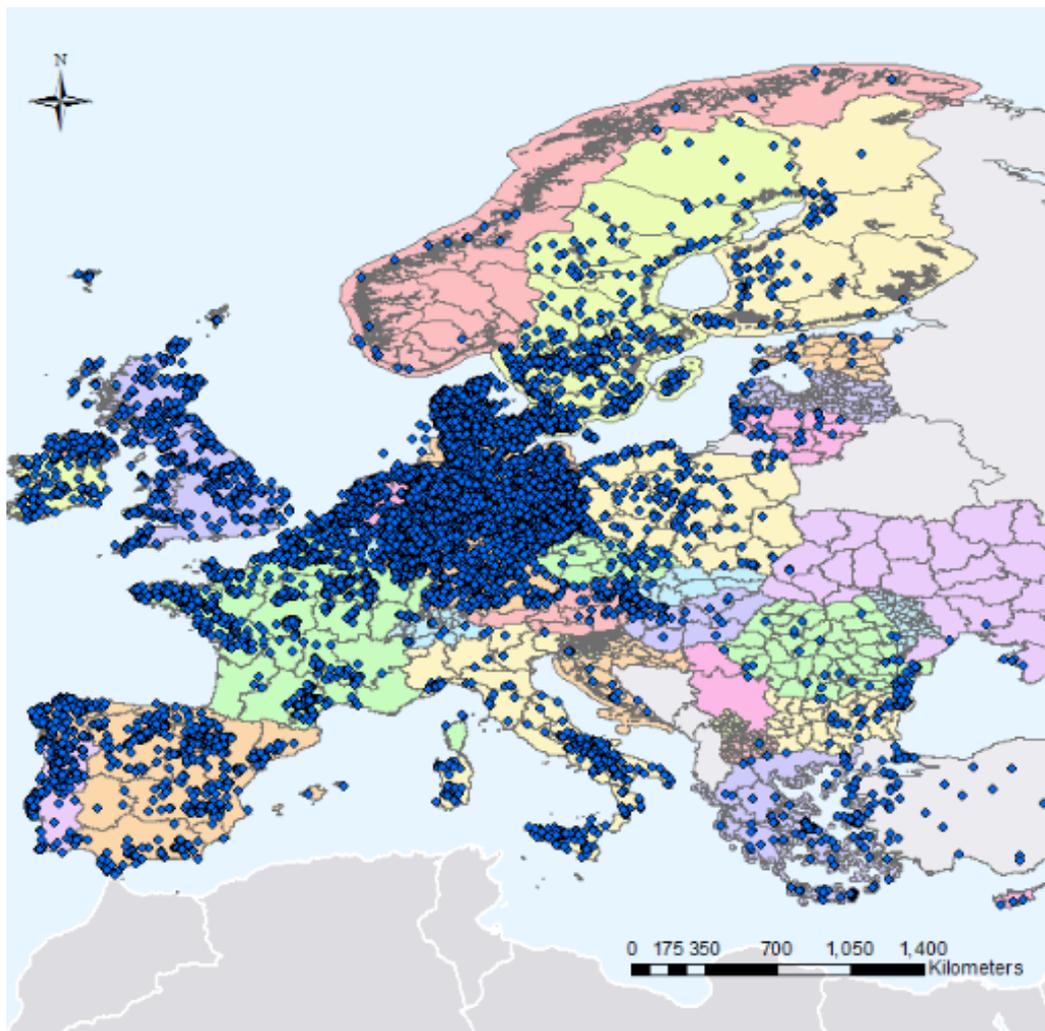
Parco eolico offshore

Un parco eolico offshore è un parco eolico situato nell'oceano. I parchi eolici offshore possono sfruttare i venti più forti e costanti che si trovano sull'oceano.

La torre

Di altezza compresa tra i 80 e i 115 metri, innalza verso il cielo la navicella all'interno della quale sono ubicati i vari meccanismi che consentono di convertire il vento in elettricità. La velocità del vento cresce con la distanza dal suolo, motivo per il quale è necessaria questa altezza per le pale eoliche. All'estremità della navicella è presente un rotore - diametro tra i 90 e i 150 metri - composto da un mozzo su cui sono fissate le pale eoliche (lunghezza tra i 10 e gli 85 metri circa).

DIFFUSIONE EOLICO EUROPA (2020)



PALE TURBINE AD ASSE ORIZZONTALE

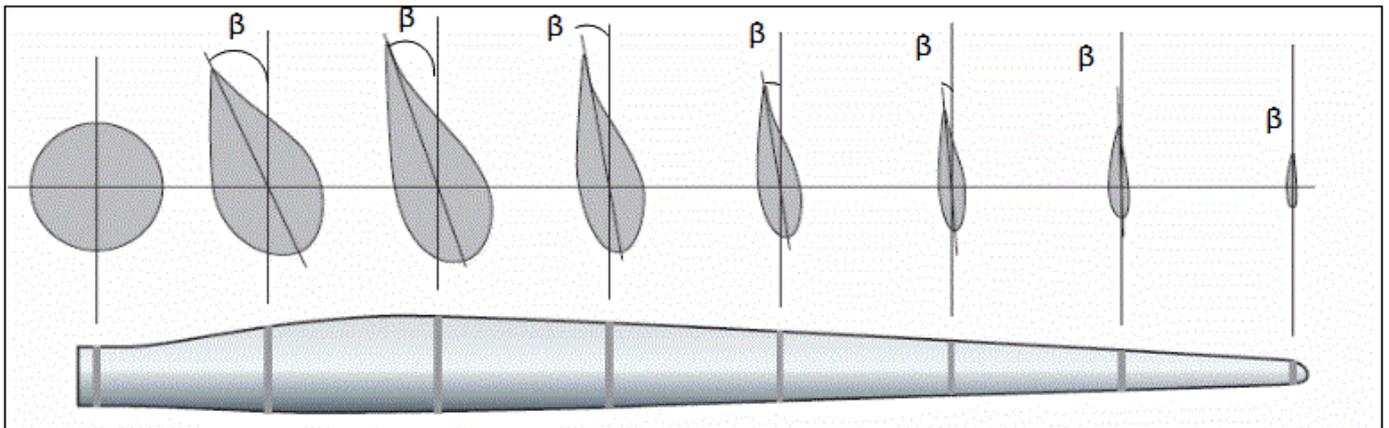
Le pale di una turbina eolica sono adibite ad entrare in contatto con il flusso ventoso ed a subire una spinta propulsiva da quest'ultimo; solitamente sono in fibre di vetro o polimeri vetrosi, in modo da migliorarne resistenza e robustezza, per poter sopportare raffiche ventose di violenta intensità a cui potrebbero essere soggette.

La pala non è un organo fisso, ma regolabile e grazie ad un supporto alloggiato sul mozzo, viene permessa la rotazione della pala, per la regolazione dell'angolo di pitch. La pala deve avere la stessa portanza lungo tutto il braccio, e quindi la medesima spinta. Premesso che la portanza è direttamente proporzionale all'angolo d'attacco e l'angolo d'attacco varia con la velocità; essendo la velocità periferica delle pale crescente dal mozzo verso l'estremità, per mantenere costante la portanza dovrà essere per forza modificato il calettamento.

È per questa ragione che l'elica si presenta svergolata, cioè con un calettamento variabile dal mozzo verso l'estremità.

Cioè il calettamento diminuisce man mano che aumenta sul profilo dell'elica la velocità periferica allontanandosi dal mozzo.

Quindi bisogna diminuire l'angolo β per mantenere un buon angolo d'attacco α che è l'angolo tra l'asse della pala e la velocità risultante tra quella di rotazione della pala e quella del flusso ortogonale alla pala.



Andamento dell'angolo di pitch all'aumentare del raggio della pala

Le forze aerodinamiche variano con il quadrato della velocità locale e crescono rapidamente con il raggio, importante quindi è progettare le sezioni più vicine alle estremità della pala in modo tale che abbiano buona portanza e scarsa resistenza.

La sezione della pala di una turbina eolica è piuttosto spessa, allo scopo di ottenere l'elevata rigidità necessaria per resistere ai carichi meccanici variabili che agiscono su di essa nel corso del funzionamento, durante la sua vita utile la pala è soggetta a carichi variabili che determinano usura, e ciò costituisce la maggiore difficoltà tecnica nella progettazione delle pale.

È necessario, inoltre, effettuare un'analisi accurata per eliminare il rischio di risonanza tra i diversi oscillatori meccanici (pale, torre, organi di trasmissione, ecc.).

I fulmini costituiscono una delle principali cause di avaria; viene perciò fornita una protezione attraverso l'installazione di conduttori, sia sulla superficie della pala, sia al suo interno.

MOLTIPLICATORE DI GIRI

Il moltiplicatore di giri è impiegato per incrementare la velocità del rotore fino ai valori richiesti dai generatori convenzionali.

Ciò perché generalmente i rotori delle turbine eoliche girano a velocità molto basse.

Tipici rapporti del moltiplicatore possono superare gli 1:100.

Il moltiplicatore di giri è comunque una sorgente di rumore, che i produttori si sforzano di ridurre, per esempio utilizzando moltiplicatori elicoidali invece di moltiplicatori ad assi paralleli.

GENERATORE

Il generatore è l'unità di trasformazione dell'energia meccanica in potenza elettrica.

Vi sono due tipi principali di generatori: asincroni e sincroni.

La grande differenza tra i due è la velocità di rotazione. Infatti il generatore sincrono deve ruotare a velocità costante e viene magnetizzato (eccitato) da una fonte di alimentazione dedicata, mentre il generatore asincrono può ruotare ad una velocità non costante (sempre però nell'intorno della velocità di sincronismo), dove la differenza tra la velocità di rotazione e di sincronismo è chiamata slip e viene magnetizzato dalla rete stessa quindi ha bisogno che la rete sia già attiva per partire.

Il generatore più diffuso è il sincrono ed è inoltre il più versatile per le regolazioni di tensione e di frequenza, ciò perché può funzionare sia come generatore, sia come motore, a seconda del valore della velocità di rotazione (ω):

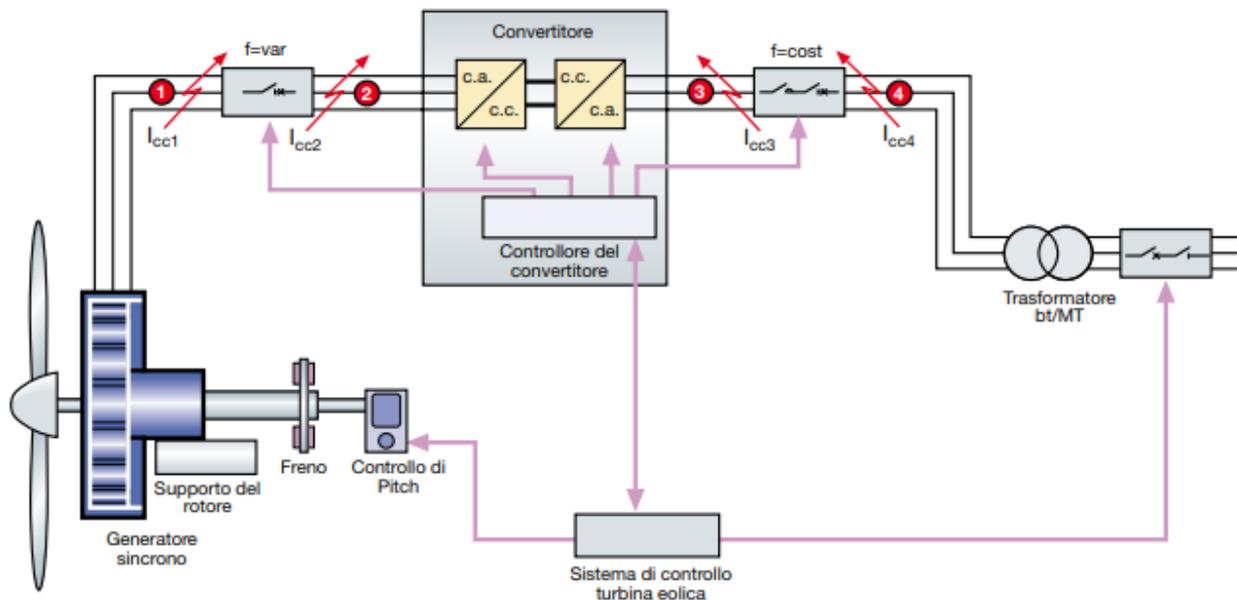
- $\omega < \omega_n$ allora il generatore supplisce ai deficit di produzione e funge da motore;
- $\omega > \omega_n$ si traduce in un surplus di produzione e il generatore si comporta come tale.

Dove ω_n velocità di rotazione nominale, cioè quella definita in sede di progetto.

TRASFORMATORE

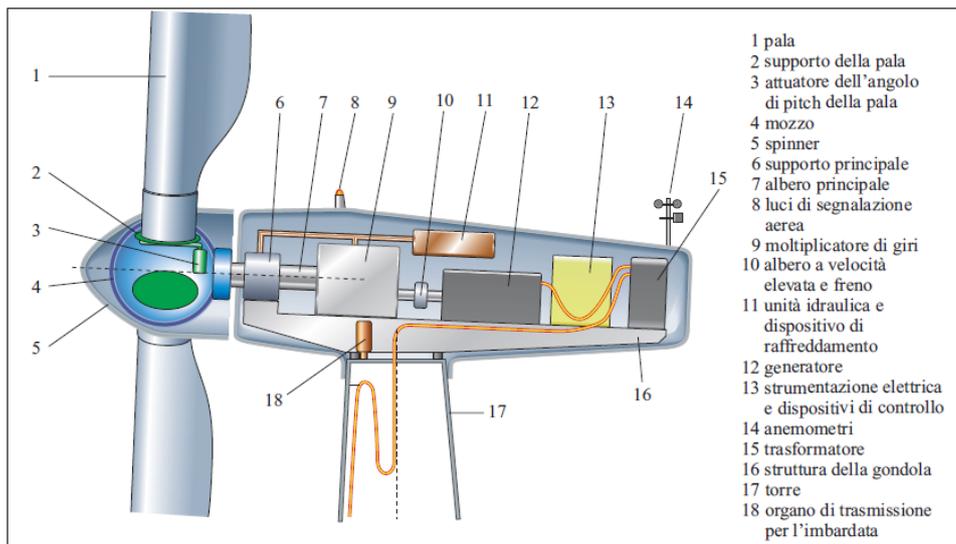
Il livello di tensione di uscita del generatore è relativamente basso e deve essere aumentato a un livello medio per mezzo di un trasformatore, per ridurre le perdite di trasmissione.

I cavi elettrici flessibili, che collegano la gondola alla base della torre, formano un anello al di sotto della gondola, per consentirne i movimenti di imbardata. Tali movimenti vengono monitorati: se la rotazione è superiore a due giri, la gondola viene imbardata in direzione opposta durante il periodo successivo di assenza di vento, per sbrogliare i cavi.



Schema tipo di un collegamento di una turbina eolica alla rete di distribuzione elettrica

FUNZIONAMENTO, REGOLAZIONI, CONTROLLI



Le pale iniziano a muoversi quando il vento raggiunge la velocità minima di avvio (cut-in wind speed).

Le soglie di cut-in sono variabili in funzione della taglia del generatore; di solito per l'avvio di aerogeneratori di piccolissima taglia sono sufficienti velocità del vento molto basse, anche soltanto di 2-3 metri al secondo.

Il rotore è collegato ad un albero di trasmissione, che ruota all'interno della navicella.

Grazie a un generatore elettrico l'energia di rotazione meccanica dell'albero di trasmissione si trasforma in energia elettrica.

L'elettricità prodotta viene convogliata nei cavi che corrono all'interno della torre e che provvedono a distribuirla all'utenza o alla rete elettrica.

Rotore e generatore elettrico possono essere direttamente collegati oppure associati ad un moltiplicatore di giri.

Indispensabile nei grandi aerogeneratori, il moltiplicatore di giri fa sì che la lenta rotazione delle pale permetta comunque una corretta alimentazione del generatore elettrico. Le macchine eoliche più piccole, caratterizzate da alte velocità di rotazione delle pale, possono anche fare a meno del moltiplicatore di giri.

La maggior parte degli impianti eolici, sia isolati che connessi alla rete, sono dotati di un inverter.

L'inverter trasforma la corrente continua (CC) in corrente alternata (CA) a 220 Volt, rendendola adatta per l'immissione in rete o per l'autoconsumo. Soltanto nel caso di piccole utenze isolate e alimentate direttamente in CC, è possibile fare a meno dell'inverter.

All'aumentare della velocità del vento corrisponde un progressivo aumento della potenza istantanea erogata dalla macchina, fino al raggiungimento della velocità nominale (rated wind speed), cioè della velocità del vento nella quale il generatore raggiunge la potenza di targa.

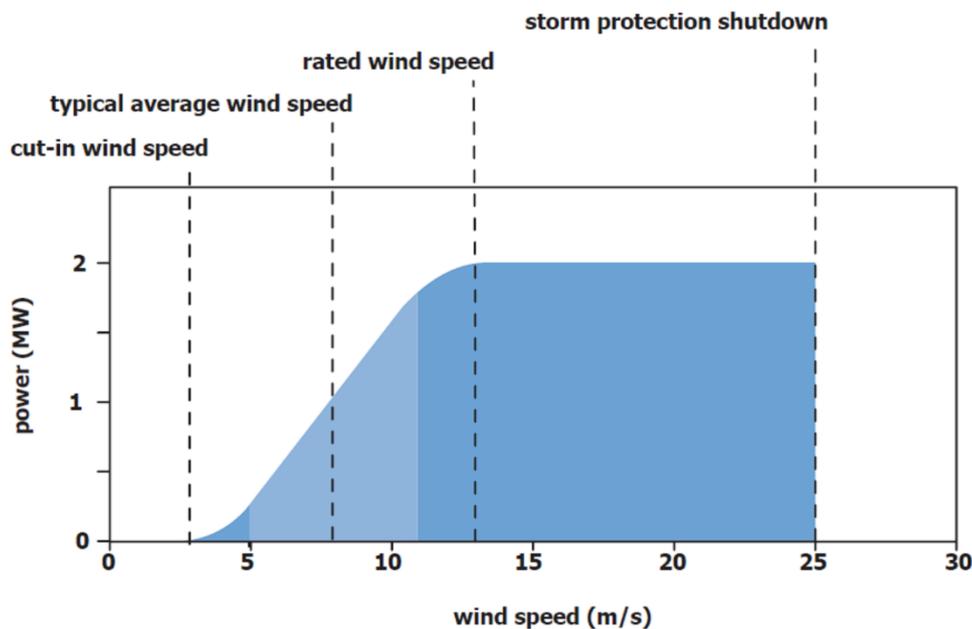
Il picco di potenza erogata rimane costante fino alla soglia massima (cut-out wind speed) di velocità del vento tollerata dalla macchina. Oltre questa soglia, il generatore smette di produrre energia e si mette in sicurezza, ricorrendo a sistemi attivi o passivi di protezione, al fine di evitare danni alle componenti meccaniche.

Nella figura sottostante si vede che turbina eolica entra in funzione a velocità del vento di circa 3 m/s (velocità di cut-in), e raggiunge la sua potenza nominale a velocità di circa 13-14 m/s.

A velocità del vento superiori, il sistema di controllo del passo inizia a funzionare in maniera da limitare la potenza della macchina e da prevenire sovraccarichi al generatore ed agli altri componenti elettromeccanici.

A velocità di circa 25 m/s (velocità di cut-off), il sistema di controllo orienta le pale in modo tale da mandare in stallo il rotore e da evitare forti sollecitazioni con conseguenti danni meccanici e strutturali.

L'obiettivo è quello di far funzionare il rotore con il massimo rendimento possibile con velocità del vento comprese tra quella di avviamento e quella nominale, di mantenere costante la potenza nominale all'albero di trasmissione quando la velocità del vento aumenta e di bloccare la macchina in caso di venti estremi.



Turbina da 2MW di potenza nominale

I SISTEMI DI REGOLAZIONE E CONTROLLO

Tutti i generatori eolici possiedono sistemi più o meno sofisticati di regolazione e controllo, in grado di adeguare istantaneamente le condizioni di lavoro della macchina al variare della velocità e della direzione dei venti.

Il controllo della potenza

Il sistema di controllo della potenza ha la funzione di ottimizzare la potenza erogata, al variare della velocità del vento.

Esistono due tipologie di sistemi di controllo della potenza:

- **Controllo di passo:** le pale sono realizzate in modo da poter ruotare intorno al proprio asse. Si tratta di una forma automatizzata di controllo, che aumenta o riduce la superficie esposta al vento e modifica in questo modo l'efficienza aerodinamica delle pale.
- **Controllo di stallo:** le pale non ruotano intorno al proprio asse, poichè sono vincolate al mozzo. Si sfrutta quindi il disegno aerodinamico delle pale per il controllo della potenza, oppure (ma solo per le turbine di potenza inferiore ai 10 kW) si sfrutta la deformazione delle piccole pale alle alte velocità del vento. Si tratta in ogni caso di un controllo della potenza di tipo passivo.

Inoltre, per la protezione della turbina da venti ad alte velocità, sono previsti diversi dispositivi di sicurezza.

Le turbine sono dotate di sistemi frenanti, che provvedono a rallentare la velocità di rotazione del rotore, fino alla soglia massima di vento tollerata (cut-out wind speed).

Oltrepassata la velocità di cut-off, la turbina smette di produrre energia e si mette in sicurezza in due possibili modi:

- il completo arresto del rotore
- il disallineamento tra l'asse del rotore e quello di rotazione della pala

I micro e mini generatori utilizzano soprattutto quest'ultima soluzione, poichè si tratta di meccanismo passivo che non richiede la presenza di dispositivi elettronici. Semplicemente, alla velocità di cut-off il rotore, grazie alla presenza di una "cerniera", ruota verticalmente sul proprio asse.

LA REGOLAZIONE DI IMBARDATA

L'imbardata è la rotazione della turbina intorno al proprio asse verticale, indispensabile per posizionare il rotore secondo la direzione del vento. Il controllo dell'imbardata contribuisce anche a regolare la potenza prodotta.

I due principali sistemi di controllo e regolazione dell'imbardata sono:

- Regolazione attiva dell'imbardata: le turbine di media e grande taglia sono dotate di un sofisticato servomeccanismo, regolato da un anemometro, che garantisce l'allineamento ottimale tra l'asse del rotore e la direzione del vento.
- Regolazione passiva dell'imbardata: per orientare la navicella in base alla direzione del vento, le turbine di piccola taglia sono dotate di un semplice timone (o banderuola) direzionale.

CONTROLLO DEL PASSO DELLA TURBINA EOLICA

Il sistema di controllo passo della turbina eolica può modificare l'incidenza delle pale del rotore in un generatore di energia eolica in base alla velocità del vento rilevata in tempo reale in modo da regolare la potenza di uscita, ottenere un maggiore rendimento dell'energia eolica e fornire protezione alle pale.

Quando la velocità del vento non supera la velocità nominale, l'incidenza della pala resta prossima a 0° (punto di massima potenza). Quando la velocità del vento supera la velocità nominale, il meccanismo di controllo del passo modifica l'incidenza della pala in modo che la potenza di uscita del generatore rientri nella gamma ammessa.

Le pale sono realizzate in modo da poter ruotare intorno al proprio asse. Si tratta di una forma automatizzata di controllo, che aumenta o riduce la superficie esposta al vento e modifica in questo modo l'efficienza aerodinamica delle pale.

In genere, un sistema di controllo del passo della turbina eolica è composto da un controller, meccanismi di controllo del passo, un alimentatore di riserva e un modulo di feedback per monitorare la potenza di uscita del generatore.

Gli MCU o DSC ad alte prestazioni sono spesso scelti come controller dei sistemi di controllo passo.

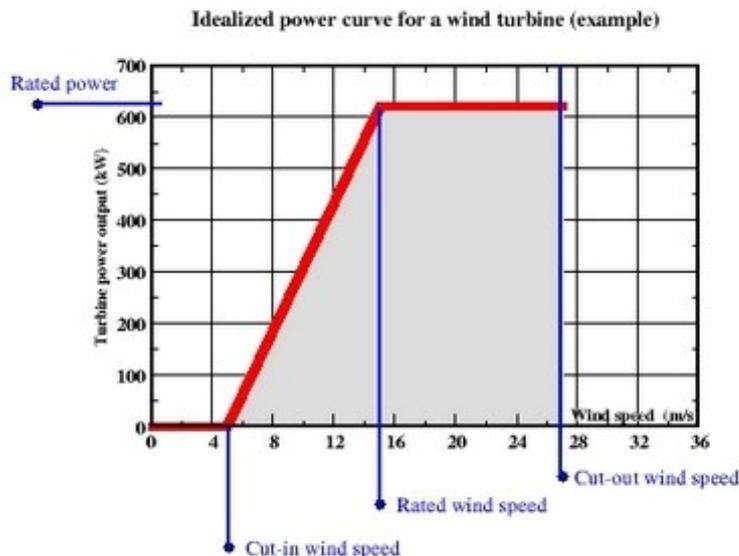
Questi componenti forniscono le istruzioni ai meccanismi di controllo del passo in base alla velocità del vento rilevata in tempo reale, alla potenza nominale preimpostata, alle informazioni sul passo e al segnale di potenza di uscita trasmesso dal generatore.

I meccanismi di controllo del passo sono in genere composti da encoder rotativi, driver gate, moduli IGBT e servomotori.

Ciascuna pala del motore necessita di un singolo meccanismo di controllo, quindi è necessario predisporre tre meccanismi in totale. Dopo aver ricevuto le istruzioni fornite dal controller, i driver gate, i moduli IGBT di questi meccanismi azionano i rispettivi motori associati e modificano l'incidenza della pala. Nel frattempo, le informazioni in tempo reale sul passo vengono trasmesse al controller tramite gli encoder rotativi. Il modulo di feedback è composto dal sensore di tensione e dal sensore di corrente che ricevono i segnali di tensione e corrente dal generatore e li trasmettono al controller. Per continuare a muovere le pale in una condizione d'emergenza, è necessario disporre di un'energia di riserva. L'energia di riserva può essere fornita da batterie o ultra-condensatori o da una soluzione ibrida che offra il meglio delle prime due.

LA CURVA DI POTENZA

Ogni turbina ha una propria caratteristica curva di potenza. La curva di potenza di una macchina eolica mostra il rapporto tra la velocità del vento e la potenza elettrica istantanea erogata dal generatore.



Curva di potenza per una turbina da 600 kW

Il grafico riporta, in maniera esemplificativa ma realistica, il comportamento di una turbina eolica da 600 kW al variare della velocità del vento. Nell'asse delle ascisse è indicata la potenza elettrica erogata, mentre l'asse delle ordinate riporta le diverse velocità del vento.

La soglia minima (cut-in wind speed) di velocità del vento richiesta per l'avvio della turbina è in questo caso di 5 m/s.

La velocità nominale (rated wind speed), cioè la velocità del vento nella quale la macchina raggiunge la potenza nominale di targa, è pari a 15 m/s.

La potenza di picco spesso è superiore alla potenza di targa, come si può notare anche nella curva di potenza riportata.

La potenza erogata rimane costante sul valore nominale fino al raggiungimento della soglia massima (cut-out wind speed) di velocità del vento, che nel caso di questa turbina è realisticamente localizzata in 27 m/s.

Non tutte le turbine sono progettate per mantenere costante la potenza erogata, con velocità del vento superiori a quella nominale. Oltrepassata la soglia massima tollerata, l'aerogeneratore si mette in sicurezza e interrompe la produzione di elettricità, per evitare il rischio di danneggiamenti.

IL CAPACITY FACTOR

Il Capacity factor (o "Fattore di utilizzo") è un indicatore che individua il rapporto tra l'energia prodotta in un intervallo di tempo e quella che avrebbe potuto essere prodotta se l'impianto avesse funzionato, nello stesso intervallo, alla potenza nominale.

In altre parole, il Capacity factor ci mostra l'efficienza reale di un impianto, individuando le ore equivalenti (solitamente su base annuale) di funzionamento alla potenza nominale.

I valori di Capacity factor degli impianti eolici variano generalmente dal 20% (1.750 ore/anno circa a potenza nominale) al 40% (3.500 ore/anno circa a potenza nominale); in alcuni casi eccezionali si arriva a valori prossimi al 50% (4.400 ore/anno circa a potenza nominale).

In Italia l'attuale Capacity factor dell'intero parco eolico nazionale è del 25%, corrispondente a circa 2.200 ore annue di funzionamento degli impianti alla potenza nominale.

ESERCIZIO: Stima della produzione elettrica di un impianto eolico

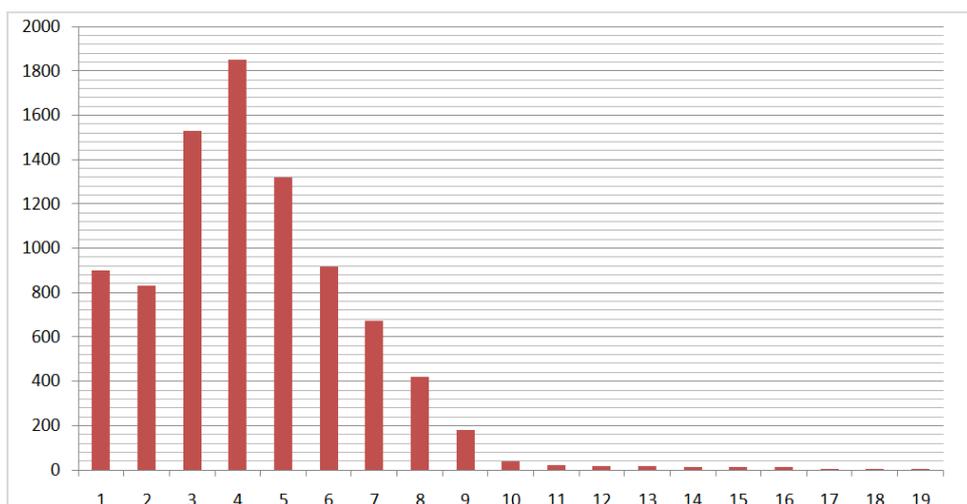
Per poter fare una stima realistica della produzione energetica annua di un generatore o di un impianto eolico, dobbiamo incrociare la curva di potenza della macchina con i dati relativi alle caratteristiche specifiche del vento.

In assenza di studi anemologici realizzati nel sito prescelto per l'installazione, spesso si fa riferimento a un dato di velocità media annua del vento, calcolato in metri al secondo (m/s). Il dato di velocità media annua, misurato a diverse altezze dal livello del suolo o del mare, è rintracciabile in tutti gli atlanti eolici (ad esempio, vedi [Atlaeolico](#)).

La velocità media annua è un parametro utile, ma che preso da solo può risultare insufficiente: zone geografiche con venti dalle caratteristiche molto diverse possono avere valori simili di velocità media del vento.

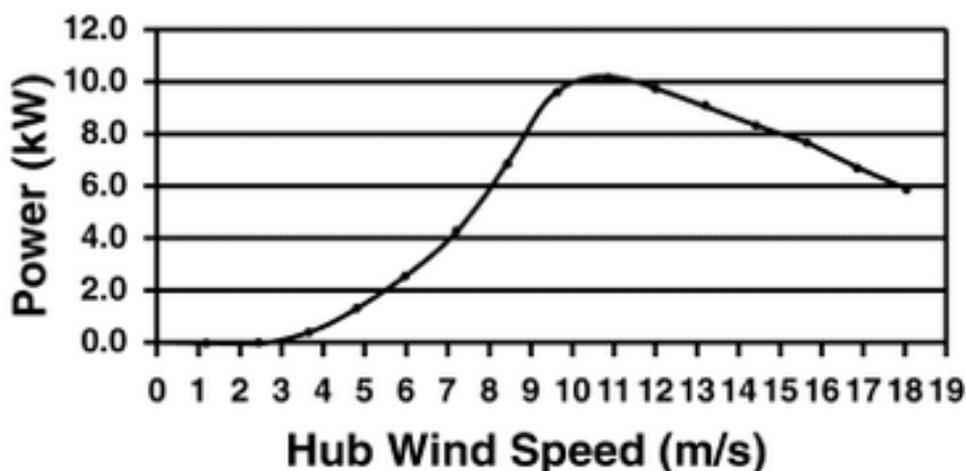
Ciò che a noi occorre è conoscere le diverse velocità del vento che insieme formano la media, per individuare quelle percentualmente più frequenti. In altre parole, bisogna conoscere la distribuzione della frequenza della velocità dei venti, possibilmente su un arco temporale di almeno un anno.

Il grafico sottostante mostra la frequenza della velocità del vento, in una località dell'Italia centrale che presenta un valore di vento medio annuo pari a circa 4 m/s.



Nota la distribuzione della frequenza dei venti, dobbiamo fare riferimento alla curva di potenza del generatore eolico e quindi incrociare i dati con la curva di Potenza della turbine per ricavare l'energia prodotta.

Prendiamo a titolo esemplificativo la curva di potenza di una micro turbina da 10 kW di figura.



Sommando l'energia prodotta dalla turbina ad ogni intervallo di velocità del vento, si può stimare la producibilità annua del micro generatore eolico.

Velocità del vento (m/s)	Durata % annua	Durata % annua cumulata	Ore/anno	Potenza turbina (kW)	Energia (kWh/anno)
1	10,3	89,7	900	Cut- in	0
2	9,5	80,2	830	Cut- in	0
3	17,5	62,7	1530	0,7	1071
4	21,1	41,6	1850	1	1850
5	15,1	26,6	1319	1,5	1978,5
6	10,4	16,1	915	2,6	2379
7	7,7	8,4	673	4	2692
8	4,8	3,6	421	6	2526
9	2,0	1,6	178	8	1424
10	0,5	1,1	40	10	400
11	0,2	0,9	20	10,5	210
12	0,2	0,7	18	10	180
13	0,2	0,5	16	9	144
14	0,2	0,3	15	8,3	124,5
15	0,2	0,2	14	7,8	109,2
16	0,1	0,1	12	7	84
17	0,1	0,0	5	6,3	31,5
18	0,0	0,0	2	5,9	11,8
19	0,0	0,0	2	Cut-out	0
TOTALE ENERGIA PRODOTTA IN UN ANNO (kWh)					15.215,5

La turbina ha una P_N di 10kW

Il Capacity factor specifico di questo impianto è del 17%, corrispondente a circa 1.490 ore equivalenti/anno di funzionamento alla potenza nominale. Si tratta di un valore al di sotto di quello medio del parco eolico nazionale, che è attorno al 25%.

$$CF = \text{Energia alla P}_N \text{ di 10Kw} / \text{E}_n \text{ prodotta} = 10\text{Kw} * (25 * 365) / 15215,5 = 17,4 \%$$

Si può notare come la gran parte della produzione elettrica sia prodotta da venti con velocità inferiore ai 9 m/s.

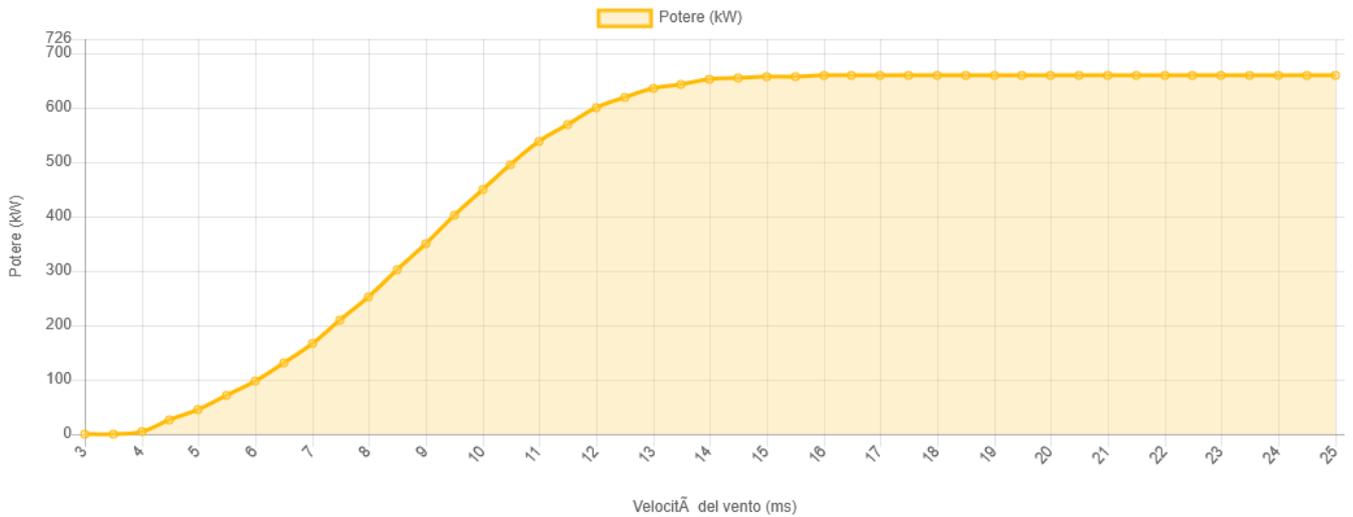
I venti compresi tra 10 e 12 m/s, che assicurano il funzionamento della turbina alla potenza nominale (10 kW), soffiano per poche ore all'anno.

In questo caso si potrebbe pensare di installare un generatore di potenza inferiore, ad esempio da 3 kW anziché da 10 kW. Infatti le turbine più piccole raggiungono la potenza nominale a velocità del vento inferiori ai 10 m/s.

Non a caso i micro generatori eolici con potenza di pochi kW sono indicati proprio per i siti meno ventosi.

CURVE DI POTENZA TURBINE VESTAS

POTENZA NOMINALE 0.6 MW



POTENZA NOMINALE 2 MW

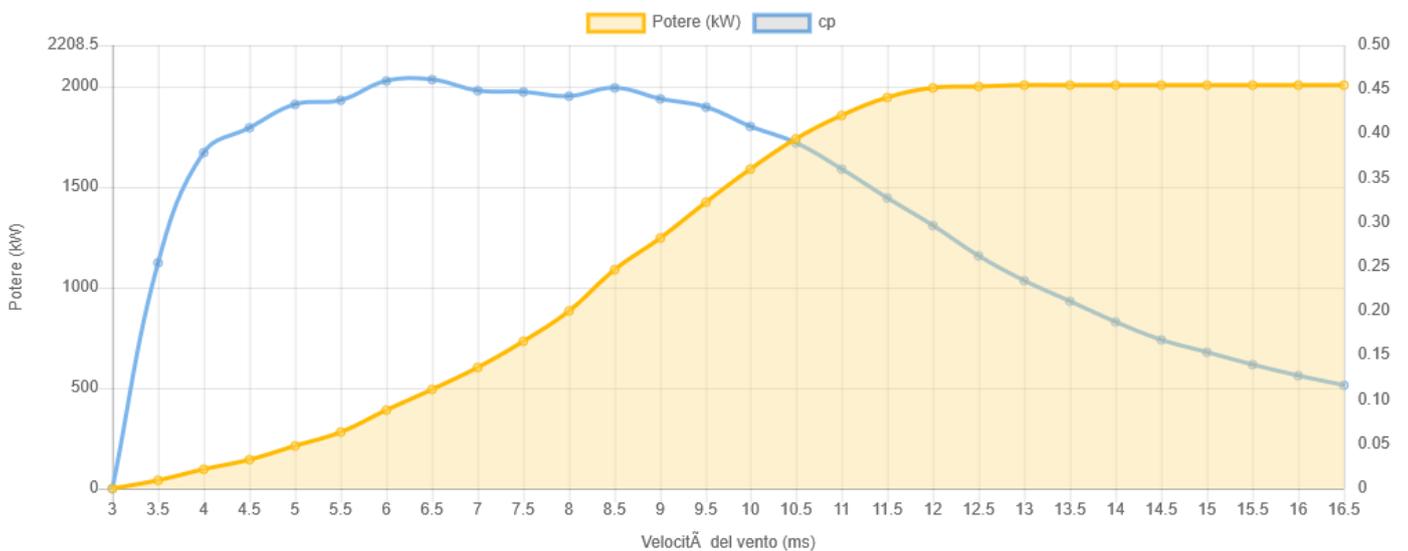


Grafico ore / v_{vento} (Frequenza della velocità del vento in una località dell'Italia centrale)

