

NiFa

LA FONTE EOLICA

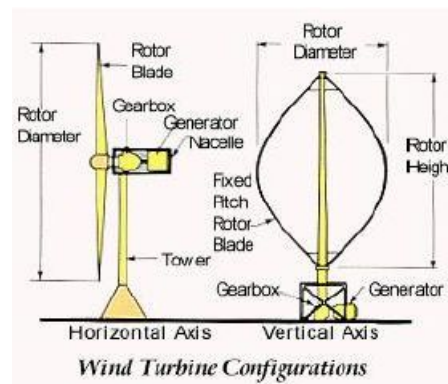
27 October 2009

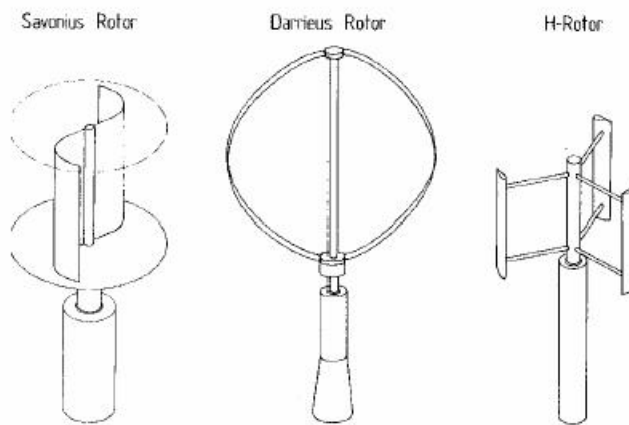
Introduzione

La **fonte eolica**, assieme alle biomasse, è una di quelle in massima ascesa. Il trend di crescita è equivalente al **fotovoltaico**, con la differenza che in questo caso si hanno potenze di circa **due ordini di grandezza superiori**. L' "eolico" in un certo senso, è legato all' **irraggiamento solare**; difatti **il vento** è il risultato dei **moti convettivi** e delle espansioni dell' aria conseguenti al **riscaldamento disomogeneo** delle **masse d' aria** presenti nell' atmosfera. Tutto ciò sta ad indicare che nell' anno, la disponibilità della fonte eolica è prossima a quella della fonte solare. Quindi, per ogni **kW installato** di potenza eolica, si ottengono all' incirca dai **1400 ai 1600 kWh/anno**.

Le **turbine eoliche** sono solitamente classificate con i seguenti criteri:

1. in base alla direzione dell' asse di rotazione:
 1. turbine ad asse orizzontale;
 2. turbine ad asse verticale;
2. in base al numero delle pale:
 1. abitualmente tre, più raramente una o due;
3. base alla potenza:
 1. piccola taglia (fino a 100 kW, Diametro < 20m)
 2. media taglia (da 100 a 1 MW, 20m < Diametro < 50m)
 3. grande taglia (oltre 1MW, Diametro > 50m).

*turbine*



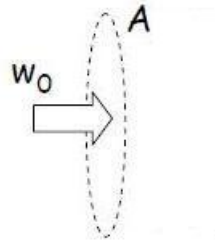
Turbine ad asse verticale

turbine varie



Impianto off-shore di Horns rev (Jutland, Danimarca): 80 turbine da 2 MW ciascuna, produzione di 600 GWh/anno (velocità media ≈ 10 m/s)

Principio di conversione



superficie A

Si immagini di considerare, in un determinato istante di tempo, una massa d' aria che intercetta una generica superficie di riferimento di area "A", con velocità "w₀"; l' energia per unità di tempo associata a questa massa d' aria (potenza meccanica) sarà:

- ENERGIA CINETICA DELLA CORRENTE D' ARIA (considerando il moto monodimensionale):

La potenza disponibile è:

$$P_0 = \dot{m} \cdot \frac{w_0^2}{2}$$

dove:

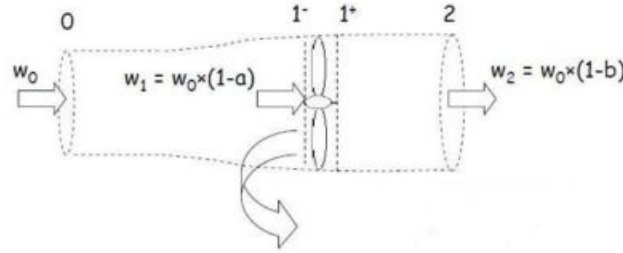
- $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot w_0$

dove a sua volta:

- $\dot{m}$ = portata massica dell' aria [Kg/s]
- ρ = densità dell' aria [Kg/m³]
- A = area della superficie di riferimento [m²]
- w₀ = velocità della corrente fluida [m/s].

Di questa potenza, solo un' aliquota di circa il 60% può essere convertita in energia meccanica e poi eventualmente in energia elettrica.

Analisi di Betz



tubo di flusso aerogeneratore

Andiamo ora a considerare una turbina eolica con generatore ad asse orizzontale, si può notare che: la corrente d'aria intercettata dalla turbina eolica, per effetto dell'interferenza che la stessa esercita, segue un tubo di flusso avente la forma come riportata in figura (in alto). In poche parole, l'aria, avvicinandosi alla turbina vede allargare leggermente la sua sezione di passaggio: tutto ciò accade perchè la turbina determina un ostacolo al normale deflusso della corrente fluida e per compensare quest'ostacolo il tubo di flusso tende ad allargarsi. Suddetto fenomeno prende il nome di "interferenza"; esso è un fenomeno assolutamente ineliminabile.

Guardando la figura (e considerando le quattro sezioni) si possono definire i seguenti "parametri":

0 = sezione in posizione "distante" dal rotore eolico;

A_0 = area della sezione in posizione "distante" dal rotore eolico;

w_0 = velocità della corrente d'aria in posizione "distante" dal rotore eolico;

1^- = sezione "immediatamente" a monte del rotore eolico;

A_1^- = area della sezione "immediatamente" a monte del rotore eolico;

w_1^- = velocità della corrente d'aria "immediatamente" a monte del rotore eolico;

1^+ = sezione "immediatamente" a valle del rotore eolico;

A_1^+ = area della sezione "immediatamente" a valle del rotore eolico;

w_1^+ = velocità della corrente d'aria "immediatamente" a valle del rotore eolico;

2 = sezione di uscita della corrente fluida;

A_2 = area della sezione d'uscita della corrente fluida;

w_2 = velocità della corrente d'aria nella sezione di uscita;

Andando ora a considerare la portata massica che attraversa il tubo di flusso, si può notare che essa per continuità, dovrà risultare sempre la stessa, infatti:

$$\dot{m} = \rho \cdot A_0 \cdot w_0 = \rho \cdot A_r \cdot w_1^- = \rho \cdot A_r \cdot w_1^+$$

dove:

$$A_r = A_1^- = A_1^+ = \text{Area spazzata dal rotore};$$

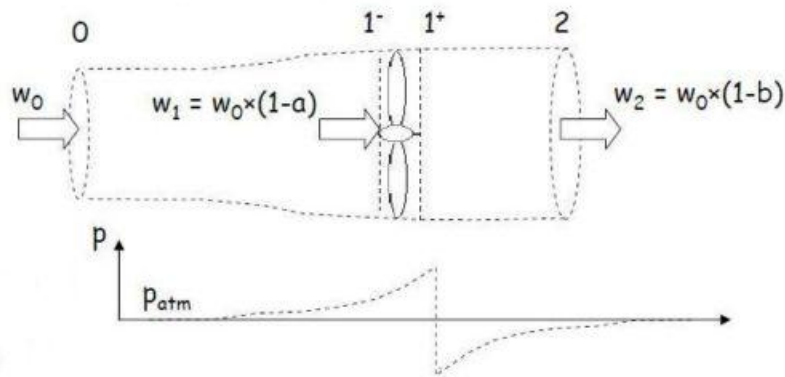
le aree sono le stesse perchè distano un "infinitesimo", dunque anche le velocità w_1^- e w_1^+ sono le stesse ($w_1^- = w_1^+ = w_1$).

Ora, poichè $A_0 < A_r \Rightarrow w_1 < w_0$. Quindi, accade che, nella prima parte del tubo di flusso percorso dalla corrente si ha una trasformazione di un' aliquota di energia cinetica in energia di pressione; infatti considerando l' equazione di Bernoulli applicata alle sezioni 0 e 1⁻ si ha:

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2}w_0^2 = \frac{p_1^-}{\rho} + \frac{1}{2}w_1^2;$$

(p_0 e p_1^- sono rispettivamente le pressioni delle sezioni 0 e 1⁻ ; $p_0 \approx p_{\text{atmosferica}}$)

dove $\frac{p_0}{\rho} < \frac{p_1}{\rho}$.



variazione pressione nel volume di controllo

La prima conseguenza dell' allargamento del tubo di flusso sarà che la portata massica reale si presenterà minore di quella ideale; dove per portata massica ideale si intende quella che la turbina elabora senza il fenomeno dell' "interferenza". Dal punto di vista analitico avremo:

$$\dot{m}_{ideale} = \rho \cdot A_r \cdot w_0 ;$$

invece:

$$\dot{m}_{reale} = \rho \cdot A_r \cdot w_1 \text{ dove } w_1 < w_0 .$$

Molto spesso si esprime la velocità w_1 in funzione di w_0 , cioè:

$$w_1 = w_0(1 - a) \text{ dove } a = \text{fattore di interferenza } (0 < a < 1) .$$

Andando a sostituire l' ultima relazione nella portata reale avremo:

$$\dot{m}_{reale} = \rho w_0(1 - a)A_r < \dot{m}_{ideale} .$$

Tutto ciò evidenzia che, indipendentemente dalla presenza di attriti e perdite di tipo fluidodinamico (trascurate in questa trattazione), la portata elaborata dalla turbina eolica sarà minore di quella ideale. Ciò spiega perchè la potenza meccanica che si riuscirà a raccogliere non potrà mai essere uguale alla P_0 (energia cinetica della corrente per unità di tempo).

Un altro tipo di perdita che si avrà nella turbina (e che andremo a verificare) è quella che riguarda l' energia cinetica associata alla velocità di uscita dell' aria dalla sezione "2" che non potrà mai essere nulla.

Andando a scrivere l' equazione dell' energia meccanica per tutto il "volume di controllo" tra la sezione 0 e la sezione 2, avremo:

$$\left(\frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2} w_0^2 \right) \dot{m} = P_{id} + \left(\frac{p_0}{\rho} + \frac{1}{2} w_2^2 \right) \dot{m}$$

$$\dot{m} = \rho w_0(1 - a)A_r , \text{ dove } P_{id} \text{ è la potenza ideale raccolta sull' asse.}$$

Facendo le opportune semplificazioni e sostituendo la portata massica, si avrà:

$$P_{id} = \dot{m} \left(\frac{1}{2} w_0^2 - \frac{1}{2} w_2^2 \right) = \rho w_0(1 - a)A_r \left(\frac{1}{2} w_0^2 - \frac{1}{2} w_2^2 \right)$$

Esprimiamo adesso la velocità w_2 in funzione di w_0 , avremo così:

$$w_2 = w_0(1 - b) , \text{ dove } 0 < b < 1 .$$

Facendo un riepilogo generale, possiamo affermare che nella zona 0 - 1 $\rightarrow$ la corrente fluida rallenta ed aumenta la sua pressione. Quindi, a monte della turbina l' aria avrà una pressione maggiore di quella atmosferica p_0 . Poi, durante il contatto con la turbina, il fluido trasferisce alla turbina l' energia meccanica (in questo caso è

energia di pressione). Nella restante parte del tubo di flusso, l'aria non potrà altro che rallentare, in modo da poter recuperare l'energia di pressione (si avrà una conversione di energia cinetica in energia di pressione).

Si può dimostrare (e non verrà affrontato nella trattazione) che $b=2a$.

Andando ora a sostituire $b=2a$ nella formula della potenza ideale (P_{id}) e cambiandola un po' nella forma, avremo che:

$$P_{id} = \left(\frac{1}{2}\right) (\rho A_r w_0^3) \cdot [(1-a)^2 \cdot 4a] = P_0 \cdot \eta_{id}$$

dove $\eta_{id} = [(1-a)^2 \cdot 4a]$ rappresenta il rendimento ideale.

Ci si pone ora il problema di trovare il valore di "a" affinché il rendimento sia massimo, andando a svolgere la derivata $\frac{\partial \eta_{id}}{\partial a}$ e ponendola uguale a zero possiamo ricavare il valore di a_{opt} (a "ottimale") che rende massimo il rendimento.

Non riportando i calcoli in questa trattazione, si può verificare che $a_{opt} = \frac{1}{3}$, il quale sostituito nel rendimento porta al seguente valore:

$$\eta_{id,max} = 0,593 \text{ conosciuto col nome di "limite di Betz".}$$

Suddetto valore rappresenta la massima aliquota di energia cinetica della corrente fluida teoricamente convertibile in energia meccanica utile.

Efficienza dell' impianto eolico

L'analisi di Betz, come si è più volte ribadito, vale in condizioni di fluido ideale (senza attriti): il rendimento effettivo della turbina è certamente inferiore.

Inoltre, considerando l'accoppiamento della turbina ad un moltiplicatore ed a sua volta di quest'ultimo ad un generatore elettrico, il rendimento reale da considerare è:

$$\eta = \eta_{rotore} \cdot \eta_{meccanico} \cdot \eta_{generatore} .$$

Un altro parametro da prendere in considerazione è il "fattore di interferenza", esso non sempre potrà essere mantenuto esattamente pari al valore ottimale (1/3). Citato fattore, per un dato profilo delle pale, è funzione del rapporto tra la velocità periferica delle pale stesse (u) e la velocità del vento (w_0), per cui η_{rotore} (anche conosciuto come Coefficiente di Potenza, C_p) non assumerà sempre valori pari al massimo.

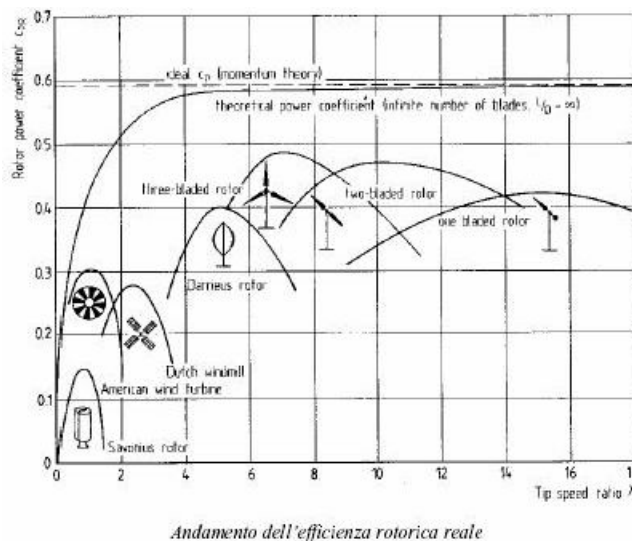
Detto ciò, la potenza effettiva sarà:

$$P = \eta \cdot P_0 = \eta \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \right) \rho A_r w_0^3 \right], \text{ con } \eta \approx 0,30 \div 0,50 < \text{limite di Betz.}$$

↓

$$P \approx (0,18 \div 0,30) \cdot A_r w_0^3 = (0,14 \div 0,24) \cdot D^2 w_0^3, \text{ dove "D" rappresenta il diametro del rotore.}$$

Di seguito si riporta un grafico ($\eta_{\text{rotore}}, \lambda$), dove $\lambda = \frac{u}{w_0}$, per varie tipologie di turbine.



efficienza rotorica

Andando ad osservare la curva "ideale" si può notare che essa presenta un andamento asintotico: ciò fa intuire che il valore ottimale del coefficiente d'interferenza lo si ottiene quando la velocità periferica tende ad "infinito". Detto in maniera più "ingegneristica", affinché l' aerogeneratore assuma un valore di " a " pari ad " $1/3$ ", la velocità periferica dovrebbe essere molto più elevata rispetto a quella dell' aria.

Osservando ora, la curva reale (prendiamo come esempio quella della turbina con tre pale), si può verificare che essa è molto più "bassa". La curva presenta un primo tratto crescente che rispecchia "quasi-perfettamente" l' andamento iniziale della curva ideale; nel secondo tratto, invece, raggiunto un "massimo", si avrà un andamento decrescente che si discosta completamente dalla curva ideale. Considerando "fissa" la velocità " u ", affermare che sta aumentando " λ ", significa che la velocità " w_0 " sta diminuendo. Mentre tale situazione, "in teoria", favorisce l' aumento del rendimento, nella realtà non è così: il peso di tutti gli attriti e le inerzie della catena cinematica, diventa sempre più grande rispetto all' "energia cinetica" della corrente. Dovremo quindi aspettarci necessariamente che, esisterà un valore di " w_0 " talmente basso tale da non essere in grado di far "muovere" oppure di mantenere "in moto" la turbina. Detto ciò, si avrà una velocità " $w_{0,minima}$ " al disotto della quale la turbina resta "ferma": tale velocità limite viene denominata velocità di "cut-in".

Un altro aspetto che si può evidenziare è che, la curva reale "non parte" dall' origine: ragionando sempre con " u " fissa, " λ " diminuisce se " w_0 " sta aumentando; se aumenta " w_0 ", crescono "proporzionalmente" le sollecitazioni (in direzione di " w_0 ") che la corrente fluida trasmette alla struttura dell' aerogeneratore. Ne consegue che esisterà un valore massimo della velocità " w_0 " oltre il quale la turbina deve essere messa in condizioni di sicurezza. Suddetta sicurezza la si ottiene mandando la turbina in "stallo" ed a questo punto il rendimento diventa "non valutabile" (in queste condizioni la turbina non funziona). Questa velocità limite di " w_0 " prende il nome di velocità di "cut-off".

L' aerogeneratore in esercizio: velocità del rotore

In riferimento alla velocità del rotore, si possono avere due modalità di esercizio:

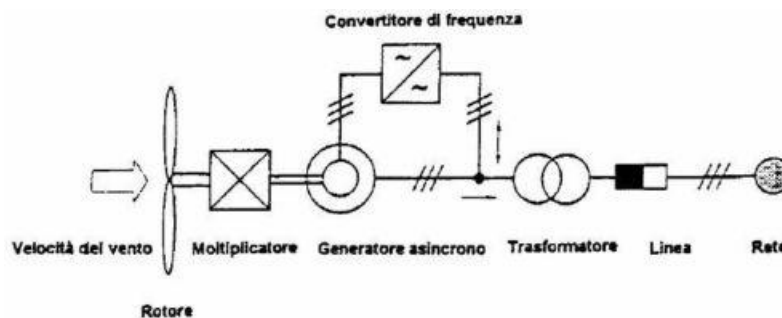
- a velocità di rotazione costante;
- a velocità di rotazione variabile.

Velocità di rotazione costante

Considerando la turbina collegata ad una rete in corrente alternata, la velocità di rotazione del generatore trifase (n) sarà funzione della frequenza e del numero di coppie polari; cioè $n=60f/p$ (misurata in giri/minuto). Quindi, dato che la frequenza di rete è assegnata, la turbina funzionerà ad una velocità di rotazione "costante". La costanza di tale velocità implica anche una velocità periferica della turbina (u) costante. Ciò significa che (ritornando al grafico dell' efficienza reale) l' efficienza dell' aerogeneratore dipenderà solamente dalla velocità della corrente fluida (w_0), quindi difficilmente (data l' aleatorietà del vento) il punto di funzionamento della turbina ricadrà nella zona di massimo rendimento reale. Oggigiorno, difficilmente troveremo aerogeneratori che lavorano a velocità costante.

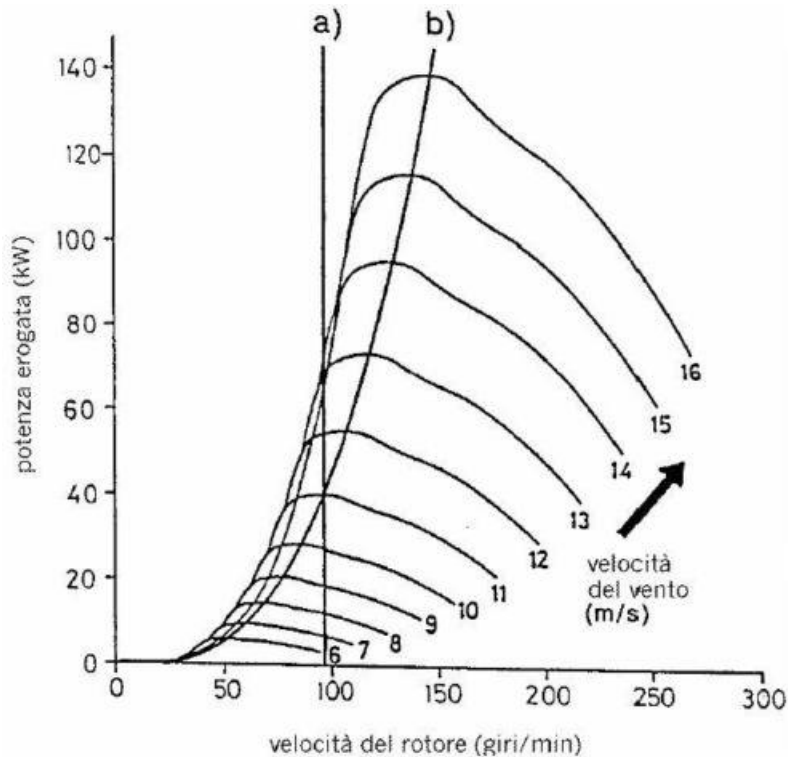
Velocità di rotazione variabile

Oramai tutte le turbine di nuova generazione sono dotate di un inverter, il quale permette all' aerogeneratore di lavorare a velocità di rotazione variabile. Velocità di rotazione variabile significa che, entro determinati limiti, si può regolare la turbina in modo tale da farla funzionare in prossimità del punto di lavoro ottimale. Ad esempio, se w_0 aumenta, si può aumentare la velocità di rotazione e quindi la velocità periferica (u), mantenendo così il valore di " λ " attorno a quello desiderato.



Turbina e rispettivi accoppiamenti

Di seguito si riporta un confronto grafico tra aerogeneratori funzionanti a velocità costante (a) ed a velocità variabile (b).



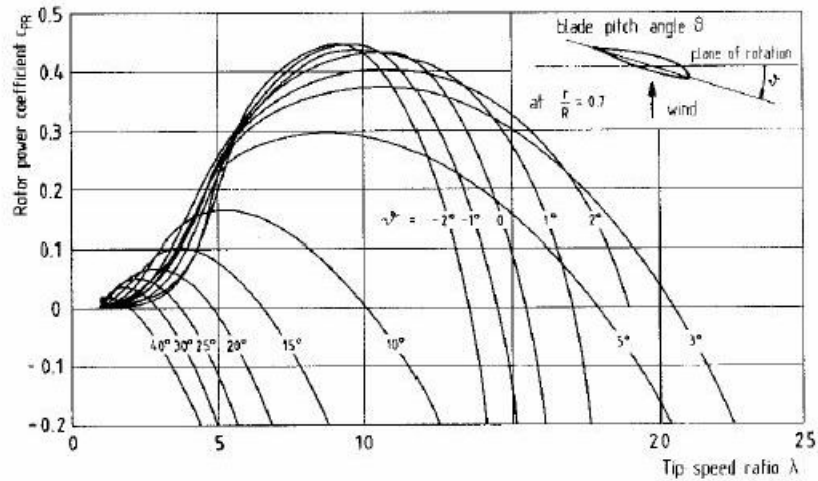
aerogeneratori a confronto

Sistemi di regolazione degli impianti eolici

Adesso sorge il problema di come mantenere il valore di " λ " attorno a quello "desiderato". A questo scopo sono nati dei sistemi di regolazione, che possono essere principalmente di tre tipi:

- **controllo dell' imbardata ("yaw control"):** consente di orientare la navicella nella direzione di provenienza del vento, ed anche di "parzializzare" la turbina, quando necessario: di fatto agisce sulla componente attiva della velocità " w_0 "; è il sistema più semplice e meno efficiente (solitamente usato solo per piccoli impianti);
- **regolazione del passo delle pale ("pitch control"):** le pale sono orientabili, in modo tale che, per una prefissata posizione della navicella, sia possibile modificare l' angolo di attacco; la turbina, però, viene comunque mandata in stallo quando necessario; è il sistema più efficiente e conseguentemente più costoso;
- **regolazione dello stallo aerodinamico ("stall control"):** il profilo delle pale è opportunamente studiato, in modo che, all' aumentare della velocità (di rotazione), oltre un certo limite, cominci lo stallo nelle zone periferiche, e poi via via lo stesso si estenda verso il mozzo ("pale svergolate").

Di seguito si riporta un grafico di efficienza di un aerogeneratore dotato di "pitch control".



Variatione di C_p in funzione dell'angolazione delle pale e del coefficiente λ
(λ =velocità periferica del rotore / velocità del vento)

aerogeneratore a passo variabile

A seguire un grafico "qualitativo" (Potenza, velocità dell' aria) di un aerogeneratore che presenta differenti sistemi di regolazione.



regolazioni a confronto

Bibliografia

Appunti tratti dal corso di "Energetica I" adattati e riveduti dal sottoscritto.

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Nifa:eolico>"