**COME SI CALCOLANO GLI AEROGENERATORI**

http://plent.altervista.org/generatore\_eolico.htm

**ALTERNATORE**- L'alternatore è la macchina elettrica che bisogna far ruotare affinchè produca energia elettrica. Le pale sono, invece la parte motrice che, per effetto del vento, girano e con esse l'alternatore. In questa pagina vogliano far vedere come viene costruito un alternatore partendo dalla costruzione dello [statore](http://plent.altervista.org/statore.htm).

**ELICA** - A secondo del tipo di generatore utilizzato, impone un certo tipo di elica, ma questa è condizionata dal sito dove è collocato l'aerogeneratore. Un'elica ha tre pale è complicata a progettarla e richiede un mozzo particolare e ruota lentamente. La bipala sarebbe l'elica giusta ma è sempre legata alla velocità del vento. La monopala sarebbe da escludere a priori vista la difficoltà che c'è nell'equilibratura.



**VENTO** - E' la parte più importante, la fonte di energia, che merita perciò uno studio approfondito. Cominciamo subito a dire che per luoghi dove la velocità media del vento è inferiore a 5 m/sec, vale a dire 18 Km/h, la convenienza di produrre elettricità con un aerogeneratore è pittosto discutibile. Con il chè spero di deludere i più ottimisti!

Ma vediamo di ragionare sui calcoli che altri hanno sudato prima di noi.La formula regina, in campo eolico, che permette di calcolare la potenza estraibile dal vento, è :

**P = Cp x 0,64 x A x V3**

dove:  
- **P** è la potenza in watt  
- **Cp** è un coefficiente che varia a seconda del tipo di rotore, e che per un' elica bipala si può fissare in 0,35 mentre , per un tripala si può fissare a 0,5  
- **A** è la superficie del disco dell' elica  
- **V** è la velocità del vento, in m/sec

La formula è interessantissima perchè permette di fare alcune importanti considerazioni:  
- la potenza ottenibile è proporzionale alla superficie del disco dell'elica, o se preferite, al quadrato del suo diametro  
- la potenza ottenibile è proporzionale al cubo della velocità del vento. Facciamo un esempio: Con un rotore bipala del diametro di 3 metri, ed un vento di 10 m/sec.,la potenza estraibile, applicando la formula di cui sopra, è di 1.500 watt.   
Da leccarsi i baffi !Cosa succede, però, se il vento cala a 5 m/sec ? Fate i conti ed il risultato sarà di 200 watt !E se l' elica è di 2 metri di diametro, anzichè 3 ? Il risultato diventa 88 watt.

Siete rimasti delusi, non è vero ? Voglio infierire. La potenza di cui sopra deve intendersi "teorica", perchè si dovrà anche tener conto del rendimento della trasmissione elica-alternatore, fatta a cinghie od ingranaggi, del rendimento dell' alternatore, delle perdite di trasporto dell' energia elettrica(caduta di tensione), e delle perdite all' accumulatore per riscaldamento dello stesso. Se poi vorrete utilizzare la corrente a 220 volt, aggiungiamo pure il rendimento dell' inverter CC/CA.

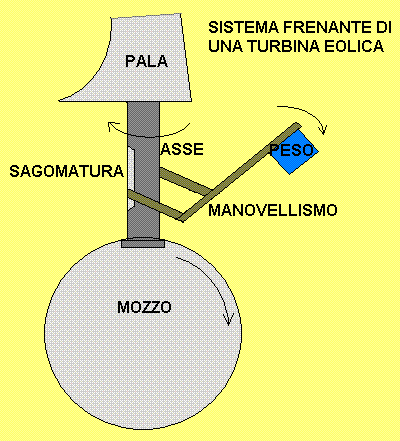
http://plent.altervista.org/ecofoto/bar047.gif

**Dispositivi frenanti**  
Il vento è il "carburante" del motore eolico. Và quindi attentamente studiato per poter progettare il generatore. Quasi sempre i venti sono per lo più irregolari per direzione ed intensità, e perciò devono essere rilevati, messi nero su bianco ed attentamenti studiati. Propongo un esempio, portato agli estremi ma che rende molto bene il concetto.

Ipotizziamo un sito nel quale spira in permanenza un vento costante di 6 m/sec. Ed un secondo nel quale per metà giornata c'è calma piatta, e nel resto soffia a 12 m/sec.   
In entrambi i casi la velocità media del vento è di 6 m/sec, ma sarebbe un grave errore adottare per entrambi la stessa elica, che sarebbe perfetta nel primo, ma sovradimensionata nel secondo.

Nella realtà le cose sono ancora più complicate, perchè in ogni luogo ci sono delle ventosità specifiche, e per di più non ripetitive nel tempo.

La forza di queste correnti d' aria possono essere devastanti, con pericolo anche grave per cose e persone nelle vicinanze.

In effetti il problema della frenatura dell' elica, in condizioni di eccesso di vento, è il grattacapo principale che deve porsi un autocostruttore, il primo ed il più importante.

Per quanto ne sappia io, il sistema più "umano" per risolvere il problema nel campo delle potenze che possono interessarci è quello di inserire un sistema di frenatura meccanico e progressivo, basato sull' aumento della forza centrifuga all' aumento del regime di rotazione.

Nella figura accanto viene evidenziato il principio di funzionamento di un sistema frenante dove sull'asse della pala vengono ricavate due sfaccettature su cui si incastra una forcella. Il manovellismo a 90 gradi tiene all'estremità un peso sperimentato nelle prove di laboratorio.  
Quando il mozzo gira in senso orario e con esso le pale, imprime una certa energia cinetica al peso. Quest'ultimo, non crea nessun movimento se la velocità delle pale si matiene entro entro certi limiti. Se la velocità del vento è tale da far girare troppo forte le pale della turbina, la stessa velocità di rotazione, fa acquisire al peso una energia cinetica tale da far ruotare la forcella e con essa la pala. Si riduce, così la superficie esposta al vento e quindi la velocità del rotore.

E' chiaro che il sistema frenante descritto viene applicato ad ogni pala del generatore ed ha molta importanta che i pesi siano tutti eguali.

Le pale dei moderni generatori eolici hanno una forma che si discosta molto da un semplice rettangolo.Esse sono più larghe al centro e affusolate sulle punte. Non sarebbe meglio il contrario, ci chiediamo ? Il fatto dell'essere affusolate sulle punte è per limitare la resistenza di vortice perchè una generica ala(anche le pale di eliche, elicotteri, turbine eoliche) quando funzionano necessariamente hanno su una "faccia" una pressione maggiore che sull'altra, ma all'estremità, l'ala tende ovviamente a passare dalla zona di alta pressione a quella di bassa.  
In effetti, non incontrando alcun ostacolo, questo causa un vortice ed è desiderabile che questo vortice sia il più attenuato possibile. L'ala rettangolare genera un vortice maggiore di quelle rastremate(cioè con corda minore all'estremità), che a loro volta ne genera uno maggiore di quelle a pianta ellittica.   
Una elica con una rastremazione inversa(cioè con corda maggiore all'estremità sarebbe la cosa peggiore possibile).

Negli anni '50 a qualcuno venne l'idea di fare un aereo con l'ala a rastemazione inversa (una versione di F-84) perchè pensava che più lontano dal flusso disturbato dalla fusoliera avrebbe funzionato meglio, ma si resero rapidamente conto che non era stata affatto una buona idea

Per quanto riguarda lo svergolamento,invece, è dovuto al fatto che le pale girano e quindi per il loro calettamento è necessario tenere conto sia della velocità del vento sia della velocità tangenziale della pala. Il risultato è che l'angolo del vento sentito dalla pala cambia con la distanza dal mozzo, ma questa cosa è comune a tutte le eliche(di aereo, turbine eoliche e anche se un po' meno evidente anche nelle pale di elicottero).

http://plent.altervista.org/ecofoto/bar047.gif

**Caratteristiche di un'elica**  
Se è stata determinata la velocità media del vento, e questa risulta migliore all' incirca di 5 m/sec, si può proseguire il progetto d' impianto con il calcolo di un rotore ad elica.   
Riassumo brevemente i principali dati caratteristici di un' elica :  
- **Diametro  
- Passo  
- Forma in pianta della pala  
- Numero delle pale  
- Lunghezza di corda  
- Profilo della pala**

Analizziamoli uno alla volta  
- **Diametro:** è la cosa più facile a determinarsi, perchè basta applicare la formula della potenza estraibile dal vento, dopo aver inserito i dati della velocità media e della potenza che vogliamo ricavare.

**A = P/(Cp \* 0,64 \* V3)**

**A = 3,14 \* d2/4**

Questo per un' elica bipala. Un' elica tripala a parità di potenza, avrà un diametro minore, ma anche una velocità di rotazione più ridotta.Sceglieremo perciò l' elica a due pale, per avere rapporti di trasmissione all' alternatore più bassi.

- **Passo :** è l' avanzamento che fà l' elica nella direzione di moto in una rotazione completa. (Immaginate l' elica come una vite che si impana in un foro filettato; un giro completo della vite determina un avanzamento che è proprio il passo della vite stessa). In effetti l' elica gira non in un materiale solido, come la vite nel metallo, ma in un fluido compressibile ed espandibile come l' aria, e perciò in realtà avanzerà un po' di meno del suo valore nominale di passo.La differenza tra il passo teorico e quello reale si chiama regresso. Inoltre l' elica, quando ruota ad una certa velocità, ha in tutti i punti la medesima velocità angolare. Non altrettanto costante è la velocità periferica di ciascun punto lungo la pala, che aumenta dal mozzo verso l' estremità. Incrementando tale velocità, cambia di conseguenza anche il valore della spinta aerodinamica prodotta nelle varie sezioni della pala, nel senso che aumenta dalla radice della pala verso l' estemità.   
Sino ad un certo punto, però, perchè oltre, a causa dell' inclinazione costante della pala, il profilo dell' elica andrà in "stallo", cioè si avrà una brusca caduta della spinta.   
Con l' inclinazione costante della pala rispetto al vento, cioè, un solo punto della pala lavorerebbe in condizioni ottimali, avendo i punti più vicini al mozzo che producono una spinta inferiore, e quelli più esterni, vicini all'estremità, che lavorano in condizioni di stallo e quindi di spinta quasi nulla.   
Per questa ragione, l' angolo d' inclinazione del profilo della pala deve essere diminuito progressivamente dal centro di rotazione all' estremità, cioè deve essere svergolato. E' questa necessità che dà all' elica quella sua tipica forma caratteristica, che peraltro si ritrova anche nelle eliche marine, nelle pale dei ventilatori, nelle turbine ecc.

Diametro, passo, numero dei giri di un' elica sono interconnessi e determinano le condizioni di lavoro della stessa. Se prendiamo a riferimento il gruppo elica-motore di un aereo, ad esempio, si scoprirà facilmente che, in base alle condizioni di volo, sarà utile poter variare il passo dell' elica : basso per la salita in quota, più alto per la velocità di crociera, ancora più alto per la velocità massima.

Un passo minore consentirà un avviamento con venti più leggeri, e mano a mano che il vento aumenterà, la crescita del valore di passo consentirà di "scaricare" sul carico (cioè il generatore di corrente), la massima potenza possibile. Se per caso il vento dovesse assumere intensità insostenibili, un ulteriore aumento del passo porrebbe l' elica in condizione di spinta quasi nulla (elica in bandiera).

Per semplicità meccanica, ci si dovrà accontentare, almeno per la prima realizzazione, di rotori a passo fisso. Comunque calcolare il passo per un' elica eolica è abbastanza difficile da determinare a priori, se non altro per l' incognita della velocità ottimale del vento, ed in ogni caso è bene poter prevedere degli aggiustamenti del valore di passo da potersi eseguire con l' elica già installata.

Per questo, è meglio di tutto fabbricare delle pale singole, da fissare meccanicamente al mozzo tramite viti e dadi con un sistema che permetta degli aggiustamenti (ad esempio con fori asolati su flangia e controflangia accoppiate con viti passanti).

- **Forma in pianta della pala:** come un' ala di aereo, può avere molte forme, rettangolare, rettangolare ad estremità raccordata, trapezioidale, ellittica, con varie curvature a piacimento. Ognuna ha vantaggi e svantaggi, ma se vogliamo la massima semplicità adotteremo quella rettangolare, che è più semplice da costruire, oppure leggermente trapezioidale, cioè con la corda (vedere più avanti) vicino il mozzo un po' più grande di quella all' estremità della pala.

Questa seconda forma ha il vantaggio, rispetto alla prima, di avere un rendimento leggermente più elevato, perchè produce meno resistenza indotta dai vortici di estremità (è lo stesso caso delle ali degli aerei, che in genere hanno pianta trapezia, sebbene non manchino casi di ali perfettamente rettangolari, costruite per lo più per semplicitàcostruttiva).

- **Numero delle pale :** per i motivi già spiegati in precedenti post, ne adotteremo due; (ricordate ? Minore è il numero delle pale, maggiore è la velocità angolare con la quale girerà con un vento dato).

- **Lunghezza di corda e profilo della pala :** ricordando che nelle eliche la corda è la larghezza delle singole pale, ed il profilo è la forma che ha la sezione della pala secondo la direzione normale all' asse della pala stessa e parallela alla lunghezza di corda (mi seguite ?), bisogna dire che questi due parametri sono legati costruttivamente l' un l' altro. Una corda piccola (cioè una pala di forma stretta ed allungata), avrà un piccolo spessore, che sarà più difficile da costruire, anche se più efficiente. Ma come si determina la lunghezza di corda ?

Per non annoiare troppo con formule e concetti teorici,il valore della superficie delle pale, e quindi anche quello della corda, ho già calcolato la lunghezza di corda nel caso preso ad esempio (cioè velocità del vento di 5 m/sec e diametro 2,62 mt, 2 pale), la lunghezza di corda, che viene è 20 cm.

infatti, la corda si calcola con la formula:

**C = (16 \* 3,14 \* R)/(9 \* s \* N)**

dove:  
R è la lunghezza della pala  
s è un coefficiente che tiene conto del numero delle pale della turbina.  
per es. per una monopala, s=9  
per una bi-pala, s=6  
per una tri-pala, s=5  
N è il numero di pale della turbina.

A questo punto, la corda si calcola con la formula precedente:  
**C = 16 \* 3,14 \* 2,62/ 9 \* 62 \* 2** = 0,20 = 20 cm

Adottando una forma di profilo piuttosto spessa, che è più adattabile alle varie condizioni di lavoro, occorre poter inserire nella stessa un longherone di rinforzo al quale fisseremo anche la flangia d' unione al mozzo.  
Se si vuole che la forma della pala sia trapezioidale, in maniera da aumentare leggermente l' efficienza e favorire l' avviamento del rotore a bassa velocità, basta scegliere il valore di corda più vicino al mozzo.

con la formula dell' area del trapezio si calcola di conseguenza quella, leggermente più ridotta, all' estremità. Per quanto riguarda il disegno del profilo, ci sono pronte apposite tabelline, o anche programmi che permettono di disegnarlo in qualunque scala possa servire. Per i curiosi, ho adottato (o meglio scopiazzato) un profilo NACA 4421, piano convesso a forte spessore, avente uno spessore relativo del 21 %, il che fà per la nostra pala, di 20 cm di corda, uno spessore max della stessa di 40 mm.

http://plent.altervista.org/ecofoto/bar047.gif

**I profili NACA**

Facendo opportune ricerche su internet, ho costatato di fatto che tutti i siti si limitano ad una descrizione superficiale o accentuano ad una pratica troppo manuale priva di concetti teorici o addirittura siti troppo teorica con formule matematiche complicate dove tutto dicono ma nulla capisci.   
La realtà è che vogliamo costruire una turbina eolica. Abbiamo visto come si calcola la potenza estraibile dal vento, abbiamo visto la formula per calcolare la corda, ora vogliamo passare a calcolare l'angolo di svergolamento della pala ? Non riuscivo a trovare niente in merito se non un programma che calcolava la corda per un dato raggio e automaticamente l'angolo.

E quì casca l'asino!! Infatti, nella teoria delle turboeliche possiamo disporre dei cosiddetti profili alari o meglio ancora dei profili NACA. Essi sono stati calcolati e disegnati utilizzando complicate formule matematiche, impostate all'interno di un programma che svolge automaticamente questi calcoli e alla fine provvedono alla stampa. E chiaro che ogni profilo è adoperato per certe turbine al posto di altre, qui si va dai generatori eolici all'aeronatica, alle costruzioni navali ecc. Il progettista sceglie il profilo NACA in funzione dello scopo che si prefigge.

Presentiamo qui una breve descrizione dei [profili NACA](http://plent.altervista.org/caratteristiche_geometriche_naca.htm).

I profili NACA si suddividono in profili a 4 cifre e profili a 5 cifre:   
Per i profili NACA a 4 cifre la prima cifra ha un significato geometrico, ed indica la massima freccia della mezza linea della corda in percentuale in proporzione la massima curvatura.  
La seconda cifra ha un significato geometrico, ed indica la sua posizione, cioè, la distanza dal bordo di attacco fino alla posizione della massima freccia della linea di mezzo o di massima curvatura.  
Le due ultime cifre indicano lo spessore relativo massimo del profilo in percento rispetto alla corda.  
Il profilo si ottiene mediante due parabole tangenti nel punto di massima della mezzeria della linea.  
Esempio: Il profilo NACA2415, ha un 2 percento di altezza massima della mezzeria, situata ad un 40 percento dal bordo di attacco, con un spessore relativo del 15 percento.  
I profili NACA44XX ha l'intradosso con parte convessa, per quello che sono più di costruzione complessa e come gli anteriori il XX indica il massimo spessore del profilo.

Per i profili NACA a 5 cifre, la prima cifra indica il valore del coefficiente di sostentamento ideale della curvatura del profilo, moltiplicato per 20 e diviso per 3.  
Le due cifre seguenti indicano il doppio della posizione della freccia massima della mezza linea, curvatura in percento della corda.  
Le due ultime cifre indicano lo spessore relativo massimo del profilo rispetto alla corda in percento, uguale a quello del profilo.

Nel settore eolico si fa uso di speciali cad che, oltre a calcolare i diversi parametri, disegnano in 3D il profilo alare che interessa. Quindi, chi vorrebbe trovare la solita formuletta di calcolo, rimarrà deluso perchè altrimenti sarebbe impossibile farlo manualmente.  
Questo è per chi cerca il pelo nell'uovo, altrimenti sappiamo benissimo che un'elica può essere costruita in modo molto rudimenta e sicuramente si metterà a girare di fronte ad un vento di una certà entità. Lo scopo primario è invece, ottenere da una pala che dia un rendimento più alto possibile e che giri con una velocità minima del vento.

Per calcolare una pala eolica e quindi una turbina eolica, si fa uso di speciali software, uno tra questi viene chiamato **Blade Calculator 2006** che potete scaricare da questo sito nella sezione **download**.  
Nel programma occorre inserire alcuni parametri quali:  
il numero di pale  
il valore del TSR  
l'efficienza delle pale  
la lunghezza della pala  
la velocità del vento

Cliccando sul tasto **SOLVE!** vengono calcolati 10 valori della corda e dell'angolo tra l'ascissa e la corrispondente corda.

A questo punto è doveroso dare un'occhiata a come viene [costruita una pala](http://plent.altervista.org/pala_in_fibra_di_carbonio.htm) seguendo questi criteri.

http://plent.altervista.org/ecofoto/bar047.gif

**Timone di direzione**  
Continuando il discorso sul rotore a vento, vedremo in questa pagina come fare per tener sempre orientata l' elica al vento.   
Ma interesserà a qualcuno, o il risultato di questa serie di messaggi è solo quello di occupare banda passante per nulla ?

Avete presente una fusoliera d' aereo vista di lato ? Bene. Immaginate questo aereo che venga investito da un vento laterale, cioè che spinga di lato. Oltre a farlo scorrere nel letto del vento (cioè a portarlo sottovento), l' azione di spinta laterale tenderà a far ruotare l' aereo sul suo asse verticale (detto d' imbardata), cioè a mutarne la direzione di rotta.   
Questo è dovuto al fatto che si genera un momento ruotante attorno al baricentro (momento inteso come il prodotto della forza di spinta moltiplicato per la distanza del punto di applicazione di questa dal baricentro stesso).

La testa ruotante dei generatori eolici non deroga da questa legge, con l' avvertenza che il punto di rotazione di tutto il complesso è costituito dall' asse di rotazione della testa sul palo di sostegno. In poche parole, se vogliamo che il disco dell' elica rimanga sempre in posizione normale alla direzione del vento, si dovrà aggiungere una "coda", la superficie della quale, moltiplicata per la distanza della stessa dall' asse di rotazione, costituirà il momento che raddrizzerà il complesso.   
Una semplice formula per calcolare la "coda", nel caso che la testa contenente il gruppo trasmissione-alternatore sia carenata, è la seguente :

**S = (D2 \* l)/h**   
dove:   
S è la superficie del timone di direzione   
D è l'altezza della sezione maestra della carenatura   
l è la lunghezza della carenatura   
h è l'altezza della coda

La formula è empirica, e può essere oggetto di correzione in campo; cosa per altro molto facile, perchè il timone può essere costituito da una semplice lamiera di alluminio o similare, facile da tagliare e da posizionare in loco.  
Esiste un altro sistema per l' orientamento automatico, che  
non fà uso di superfici di governo. E' il cosiddetto rotore sottovento, nel quale l' elica è posta dietro, -e non davanti-, l' asse di rotazione della testa rotante.In tal caso, le pale dell' elica devono essere "campanate", cioè piegate all' indietro (nel senso dello scorrimento del vento),in maniera che immaginando l' elica in rotazione di lato, non si vedrebbe una sola linea diametrale, corrispondente all'apertura dell' elica, ma una specie di cono, avente il vertice sul fulcro di rotazione delle pale.   
Si realizza in questa maniera un sistema di stabilità che è analogo a quello delle ali degli aerei, che, se fate caso, guardandole dal davanti, hanno le estremità più alte rispetto al loro punto di fissaggio sulla fusoliera, formando un piccolo angolo che si chiama "diedro", e che è quello che dà la stabilità del velivolo sull' asse di rotazione longitudinale.  
Il trucco funziona così : se per qualsiasi ragione una semiala si abbassa, a motivo dell' angolo dietro, la superficie della sua proiezione in pianta aumenterà, e la semiala opposta, che si alza, diminuirà corrispondentemente la sua superficie; dalla differenza tra le due semiali nascerà quindi un momento che tenderà a raddrizzare le ali, ruotando l' aereo sul suo asse longitudinale e portandolo alle condizioni iniziali.

Avevo detto che per costruire la nostra elica si era scelto il NACA 4421, e di questo profilo scrivo le coordinate :   
Ascisse estradosso intradosso   
0 0 0   
1,25 4,45 -2,42   
2,5 5,84 -3,48   
5,0 7,82 -4,78   
7,5 9,24 -5,62   
10 10,35 -6,15   
15 12,04 -6,75   
20 13,17 -6,98   
25 13,88 -6,92   
30 14,27 -6,76   
40 14,16 -6,16   
50 13,18 -5,34   
60 11,60 -4,40   
70 9,50 -3,35   
80 6,91 -2,31   
90 3,85 -1,27   
100 0,22 -0,22

Riportando i valori su due assi cartesiani e unendo i punti si ha immediatamente disponibile il profilo per una corda di 100 mm. Se serve un' altra lunghezza, ad esempio 200 mm, basta moltiplicare tutti i valori per 2, e così via.

http://plent.altervista.org/ecofoto/bar047.gif

**Piccoli quesiti**   
Calcolare il numero di giri di una pala eolica in funzione della velocita del vento

1) Scegliere quale deve essere il TSR (Tip Speed Ratio), cioè la velocità specifica della pala che è data dal rapporto (velocità lineare alla punta/ velocità del vento). Generalmente per un rotore con 3 pale si può scegliere un TSR variabile tra 5 e 7.

2) Utilizzare la seguente formula:  
**numero di giri (rpm) = V\*TSR\*60/(6,28\*R)**  
dove R è il raggio del rotore (m)   
V è la velocità del vento (m/s)

La TSR o velocità specifica, si ottiene generalmente effettuando un'ottimizzazione del coefficiente di potenza della pala in modo iterativo (si calcola il Cp della pala, che dipende dalle caratteristiche aerodinamiche del profilo, provando diversi valori della tsr, e si sceglie il valore ottimale, che massimizza il Cp a parità del valore della velocità del vento).

dimensionare una pala non è una cosa impossibile ma bisogna avere delle buone basi di aerodinamica, ed è possibile (generalmente si fa così) dimensionare una pala senza utilizzare programmi di fluidodinamica, ottenendo dei risultati numerici che generalmente differiscono poco da quelli ottenuti in realtà o con programmi CFD.