

# **GENERATORI EOLICI (AEROGENERATORI)**

**PARTI PRINCIPALI E  
CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE**

# **GENERATORI EOLICI**

**La trasformazione dell'energia cinetica posseduta dal vento in energia elettrica richiede macchine complesse e molto sofisticate.**

**La progettazione e costruzione di queste macchine è al giorno d'oggi uno dei settori della meccanica più all'avanguardia con tecnologie paragonabili a quelle dell'industria aeronautica e aerospaziale.**

**Lo sviluppo continuo delle conoscenze aerodinamiche nel settore, la ricerca di nuovi materiali e di sistemi di controllo sempre più sofisticati (sempre più spesso affidati a sistemi computerizzati e tele-controllati) rendono spesso obsolete macchine progettate solo pochi anni fa.**

# GENERATORI EOLICI

**Le macchine attualmente in uso o in sviluppo hanno raggiunto potenze e dimensioni inimmaginabili se paragonate a quelle di 10 anni fa raggiungendo ormai frequentemente i 5 MW di potenza nominale e superando in molti casi i 100 m di diametro del rotore.**



**REPOWER 5MW:  
Potenza nominale 5 Mw, Diametro rotore 126m**

# **GENERATORI EOLICI**

**Fermo restando lo sviluppo frenetico delle macchine odierne, l'impostazione generale degli aerogeneratori è rimasto sostanzialmente inalterato.**

**Lo sviluppo è infatti principalmente incentrato sull'ottimizzazione degli elementi di base costituenti le macchine che permettono di raggiungere prestazioni sempre più elevate.**

**Una conoscenza di base delle macchine eoliche e delle sue parti principali, nonché la conoscenza del modo di funzionamento dei singoli componenti, risultano essere indispensabili per chiunque si interessi di energie rinnovabili (molte componenti sono comuni anche in altri tipi di sfruttamento di energie rinnovabili) ed in modo particolare per coloro che intendono sviluppare progetti per lo sfruttamento dell'energia eolica**

# **GENERATORI EOLICI**

**Il principio di base per lo sfruttamento dell'energia eolica è apparentemente semplice: la forza del vento mette in movimento una serie di pale opportunamente sagomate, queste pale sono calettate ad un perno centrale (mozzo) che le costringe a compiere un moto rotatorio attorno all'asse del perno, al mozzo sono collegati una serie di dispositivi (freni, moltiplicatori, ecc.) che trasmettono il moto ad un generatore elettrico.**

**La corrente elettrica così generata viene prima trattata in una serie di dispositivi (gruppi di rifasamento, banchi di condensatori, trasformatori elevatori, ecc.) che la rendono compatibile con la rete di trasporto a cui, con un cavidotto apposito, verrà collegato l'aerogeneratore.**

# GENERATORI EOLICI

## **ELEMENTI PRINCIPALI DI UN AEROGENERATORE:**

**Navicella:** la parte principale della macchina, in essa sono contenuti il generatore, i moltiplicatori di giri, i freni, gli attuatori del “pitch control” e del “yaw control”.

**Rotore:** è l'insieme formato dal gruppo pale, il mozzo, l'albero lento e il meccanismo del “pitch control”.

**Torre di sostegno:** oltre a tenere in posizione la macchina, ha il compito di assorbire le vibrazioni provenienti dalla navicella evitando che le stesse vadano a scaricarsi eccessivamente sul basamento e sulle fondazioni.

# GENERATORI EOLICI

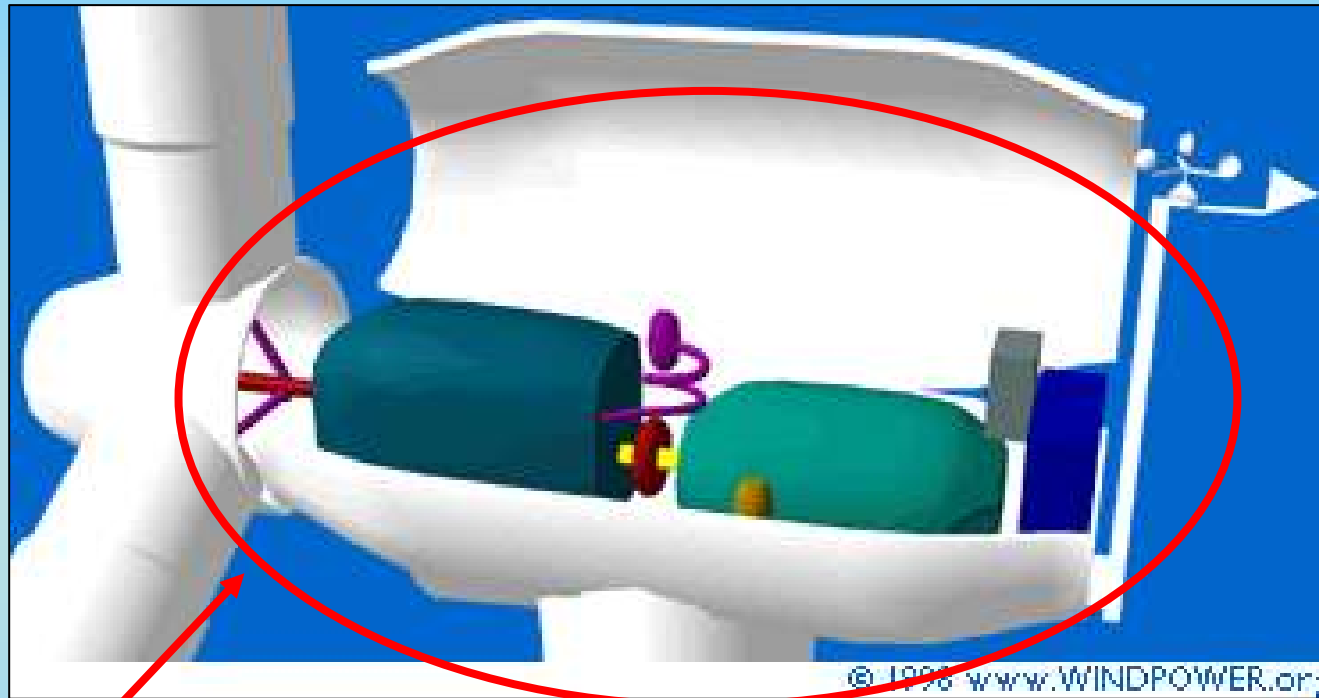
## **ELEMENTI PRINCIPALI DI UN AEROGENERATORE:**

**Sistemi di misura:** i sistemi di misura (anemometri e indicatori di direzione del vento) sono generalmente montati sulla sommità della navicella, servono a configurare correttamente la macchina a seconda della direzione e dell'intensità del vento.

**Sistemi di controllo:** monitorando continuamente una serie di parametri della macchina, sovrintendono al corretto funzionamento e permettono una rapida messa in sicurezza in caso di avaria

**Sistemi accessori:** sistemi opzionali che permettono un uso migliore della macchina (sistemi di telecontrollo, montacarichi e ascensori per il personale di manutenzione, ecc.)

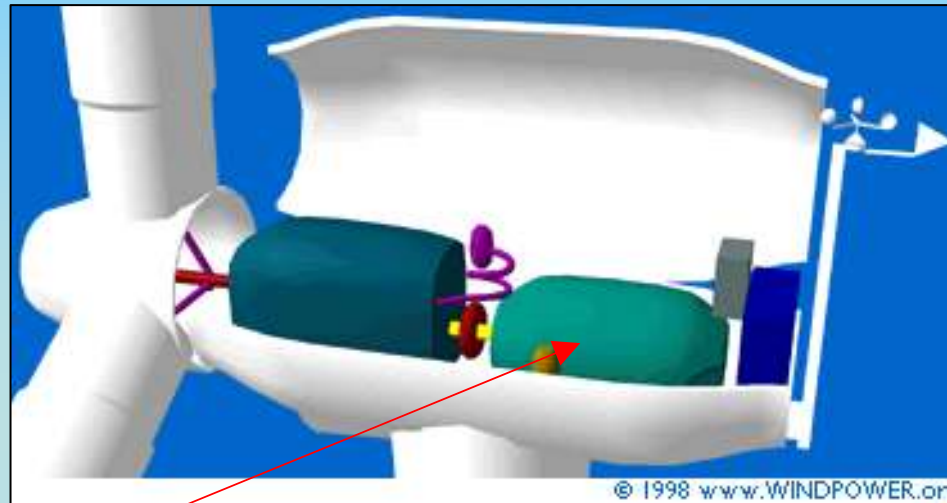
# GENERATORI EOLICI



**NAVICELLA:** l'involucro esterno ha il compito di proteggere gli elementi più delicati (generatore, moltiplicatore di giri, ecc.) dalle intemperie.



# GENERATORI EOLICI



**GENERATORE TRIFASE:** E' l'organo elettromeccanico che genera la corrente elettrica.

Negli ultimi anni, lo sviluppo dei generatori asincroni trifase ha portato al graduale abbandono dei generatori sincroni per questo tipo di applicazione.

# GENERATORI EOLICI

## GENERATORE ASINCRONO TRIFASE

Riassumiamo brevemente i principi elementari che stanno alla base del funzionamento di un generatore elettrico trifase.

Supponiamo di realizzare un sistema costituito da tre nuclei di ferro disposti a  $120^\circ$  l'uno rispetto all'altro.

Attorno ad ognuno dei nuclei avvolgiamo a spirale un conduttore elettrico che sarà collegato ad una delle tre fasi di alimentazione, realizzando un cosiddetto elettromagnete (la corrente elettrica che percorre le spirali genera un campo magnetico avente direzione legata al verso della corrente che interessa (magnetizza) il nucleo contenuto ed invertendo il verso della corrente che percorre la spirale avremo una inversione dei poli magnetici del nucleo).

# **GENERATORI EOLICI**

## **GENERATORE ASINCRONO TRIFASE**

**Poniamo, al centro geometrico di questo sistema tripolare, un magnete permanente che abbia la possibilità di ruotare attorno ad un asse normale al piano in cui abbiamo disposto i tre poli.**

**Se alimentiamo i conduttori con una corrente trifase otterremo che ciascun nucleo venga ciclicamente polarizzato nei due versi realizzando, in pratica, un campo magnetico rotante.**

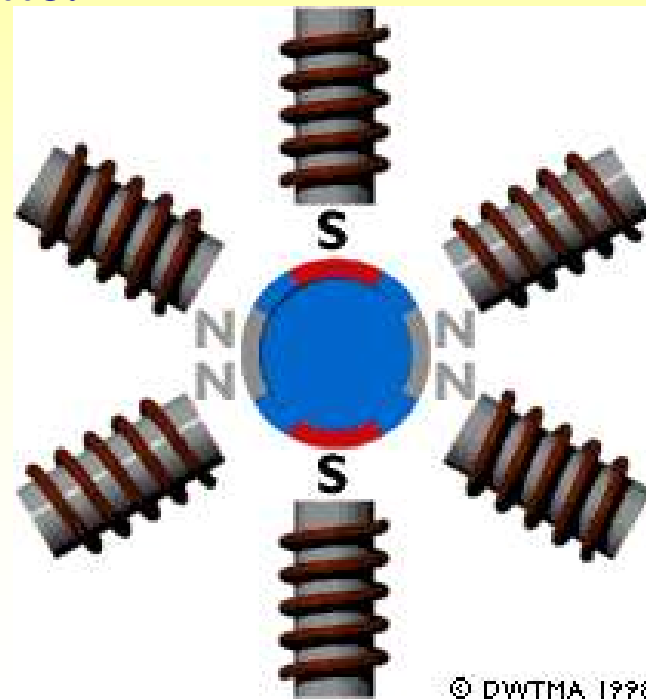
**La velocità di rotazione del campo magnetico sarà legata alla frequenza della corrente alternata di alimentazione ed al numero dei poli dello statore e del rotore.**

# GENERATORI EOLICI

## GENERATORE ASINCRONO TRIFASE

Per esempio una corrente alternata avente una frequenza di 50 Hz produrrà un campo magnetico rotante ad una velocità di 50 giri al secondo nell'esempio ora descritto.

Osserviamo infine come, aumentando il numero dei nuclei statorici (poli) e proporzionalmente quello dei poli rotorici, avremo una proporzionale riduzione della velocità di rotazione del campo magnetico.



# **GENERATORI EOLICI**

## **GENERATORE ASINCRONO TRIFASE**

Tornando al magnete permanente posto al centro dei poli, osserveremo come la rotazione del campo magnetico produrrà la rotazione del magnete; avremo così realizzato un motore elettrico sincrono.

Se a questo punto applichiamo una coppia rotante al magnete centrale vedremo come, all'aumentare del suo valore, non avremo un corrispondente aumento della velocità di rotazione come potrebbe accadere per una qualsiasi massa rotante, per esempio un volano.

# **GENERATORI EOLICI**

## **GENERATORE ASINCRONO TRIFASE**

**Ne consegue che il campo magnetico rotante dello statore cerca di mantenere il rotore correttamente orientato rispetto al verso delle sue polarità.**

**Il principio di conservazione dell'energia ci suggerisce che la coppia in ingresso viene in qualche modo trasformata e dissipata per poter mantenere costante la velocità di rotazione; il risultato di questo processo è la produzione di energia elettrica che, per mezzo di opportuni dispositivi, viene ceduta alla rete.**

# GENERATORI EOLICI

## GENERATORE ASINCRONO TRIFASE

Nei generatori eolici vengono poi spesso utilizzati generatori asincroni, derivazione dei comuni motori elettrici asincroni, essenzialmente diversi per quanto riguarda il rotore che risulta costituito, nell'esecuzione detta a gabbia di scoiattolo, da una serie di barre conduttrici collegate alle loro estremità a due anelli e da un nucleo.

In questo caso il campo magnetico statorico genera nel rotore correnti indotte che producono a loro volta un campo magnetico indotto.



© DWTMA 1998

# **GENERATORI EOLICI**

## **GENERATORE ASINCRONO TRIFASE**

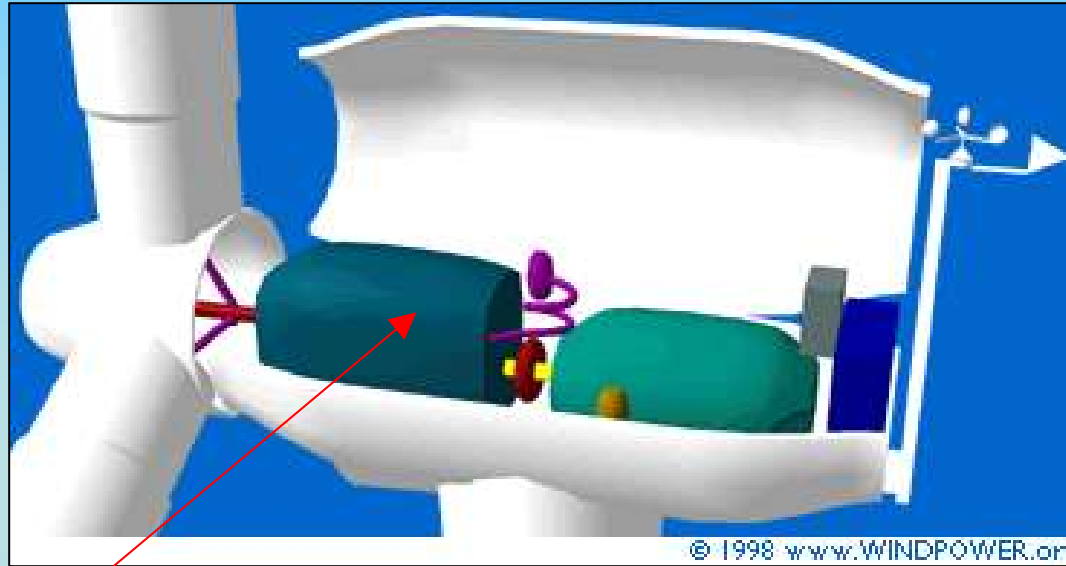
**Il generatore asincrono, a differenza di quello sincrono, deve girare ad una velocità leggermente superiore (circa 1% a piena potenza) a quella del campo magnetico rotante per poter produrre energia.**

**Il rapporto tra la velocità sincrona e quella di funzionamento è detto scorrimento e ha, in funzione della coppia applicata, piccole variazioni.**

**Questa caratteristica rende il generatore asincrono particolarmente adatto a funzionare con una coppia fluttuante quale è quella prodotta dal rotore eolico.**



# GENERATORI EOLICI



**MOLTIPLICATORE DI GIRI:** La connessione degli aerogeneratori in rete impone che la corrente in uscita sia a 50Hz.

Questo rende difficile il collegamento diretto tra rotore e alternatore (troppe coppie polari nell'alternatore o numero di giri del rotore troppo elevato).

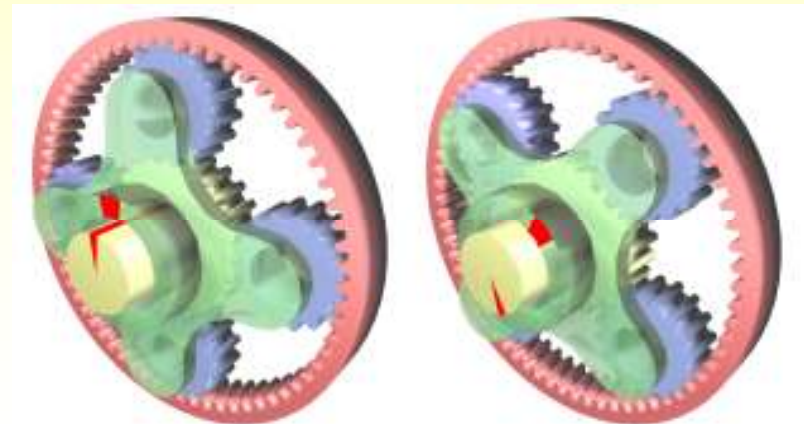
# GENERATORI EOLICI

## MOLTIPLICATORE DI GIRI:

Deve quindi essere adottato un apposito moltiplicatore di giri tra rotore e alternatore.

Il moltiplicatore di giri è formato da una o più coppie di ingranaggi di tipo epicicloidale o ad assi paralleli, i requisiti fondamentali di questo elemento sono:

- Affidabilità ed efficienza
- Poca manutenzione
- Ingombri e pesi non elevati
- Silenziosità



# GENERATORI EOLICI

## MOLTIPLICATORE DI GIRI:

Lo sviluppo negli ultimi anni di alternatori con elevato numero di coppie polari, ha reso possibile la costruzione di alcuni modelli di aerogeneratori privi di riduttore.

Il riduttore è infatti uno degli elementi che maggiormente richiedono manutenzione e causa perdite di efficienza degli aerogeneratori. Recenti indagini indicano che circa il 70% delle rotture negli aerogeneratori moderni è causato dai moltiplicatori, in particolare per problemi di lubrificazione, da cui l'impegno sempre maggiore per una sua eliminazione.



# GENERATORI EOLICI

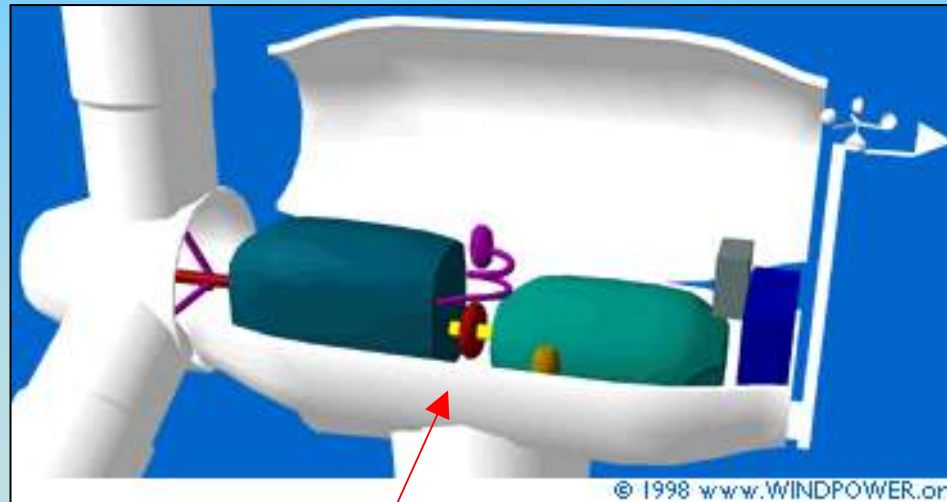
## MOLTIPLICATORE DI GIRI:

Quest'ultima soluzione semplifica di molto la parte meccanica della macchina e consente una notevole riduzione della dimensione e della massa della navicella ma ha lo svantaggio di richiedere un generatore provvisto di un numero di poli idoneo a consentire la generazione di corrente alla frequenza richiesta.

Ricordando che, per produrre corrente a 50 Hz, un generatore a 4 poli deve girare a 1500 rpm ne consegue che, per una velocità di rotazione del rotore di 30 rpm, sarà richiesto un generatore provvisto di 200 poli.

Un numero limitato di costruttori ha puntato su questa seconda opzione innovativa riuscendo in effetti ad ottenere aerogeneratori di costruzione più semplice ma la maggioranza si è affidata alla prima configurazione.

# GENERATORI EOLICI



**ALBERO VELOCE E FRENO:** L'albero veloce collega il riduttore con l'alternatore, un freno meccanico o elettroidraulico ferma il rotore in caso di:

- manutenzione,
- messa in sicurezza,
- guasto,
- vento troppo debole o troppo forte

# GENERATORI EOLICI

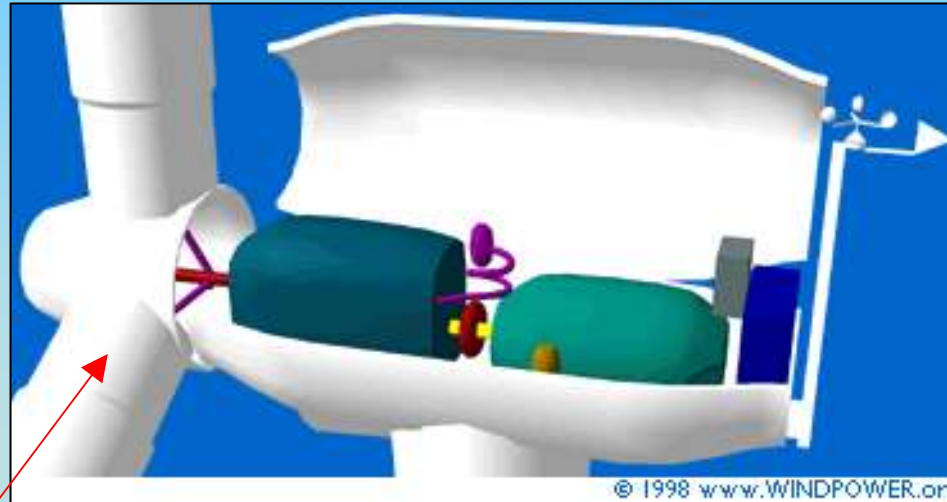
**YAW CONTROL:** L'angolo di yaw è l'angolo di rotazione della navicella sul proprio asse verticale.

Dal momento che la macchina deve sempre essere allineata rispetto al vento, un sistema di movimentazione attivo formato da attuatori elettrici e relativi riduttori, provvede a movimentare la navicella a seconda della direzione di provenienza del vento registrata da un apposito strumento (indicatore di direzione) posto nella parte posteriore della navicella stessa.



© 1998 www.WINDPOWER.org

# GENERATORI EOLICI



**ROTORE:** Il rotore è l'organo più importante di un aerogeneratore, è infatti il meccanismo che fisicamente “raccolge” l'energia del vento.

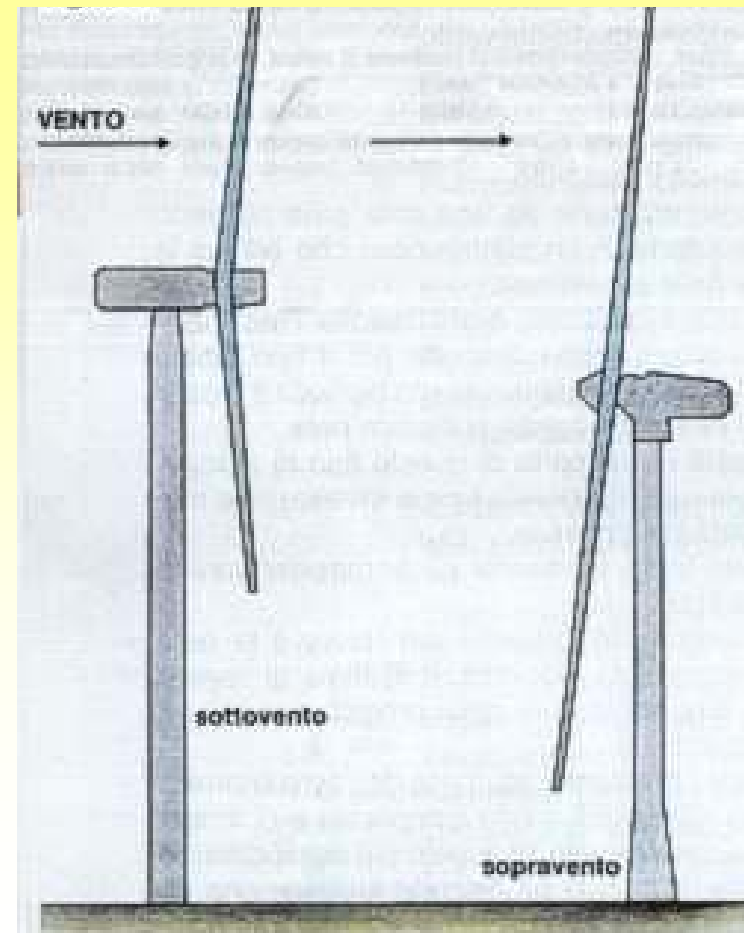
E' formato da un mozzo centrale su cui sono montate le pale in posizione fissa o con possibilità di ruotare rispetto al proprio asse longitudinale (meccanismo di pitch).

# GENERATORI EOLICI

## ROTORE

Il rotore è poi montato sulla navicella, tramite un'apposita flangia con cuscinetti, con asse orizzontale o leggermente inclinato verso l'alto.

Il rotore inoltre può essere montato sopravento o sottovento





# GENERATORI EOLICI

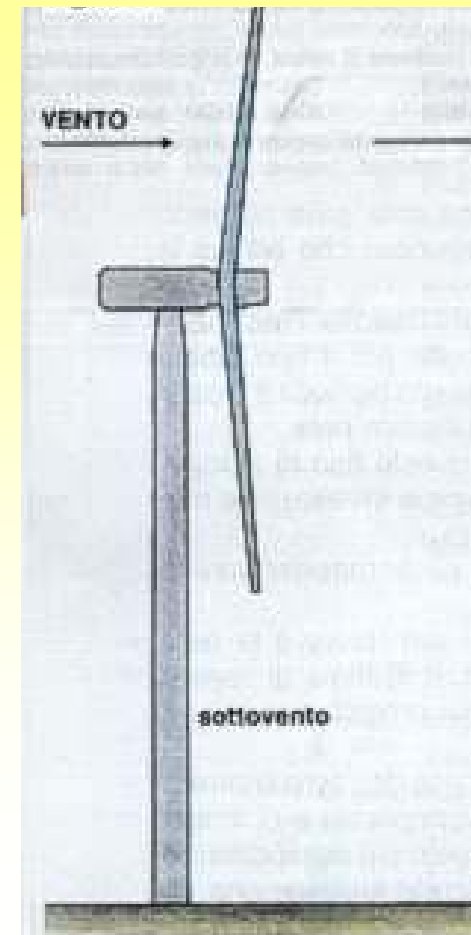
## ROTORE SOTTOVENTO

**Il rotore sottovento ha il vantaggio di:**

- essere autoallineante rispetto al vento,
- può avere pale più flessibili,
- è più leggero,

**Ha invece il grosso svantaggio di:**

- essere fortemente schermato dalla torre,
- genera carichi pulsanti su tutta la struttura,
- ha una efficienza minore,



# GENERATORI EOLICI

## ROTORE SOPRAVENTO

Il rotore sottovento ha il vantaggio di essere più efficiente, ma richiede pale più rigide ed una maggior distanza del rotore dalla torre.

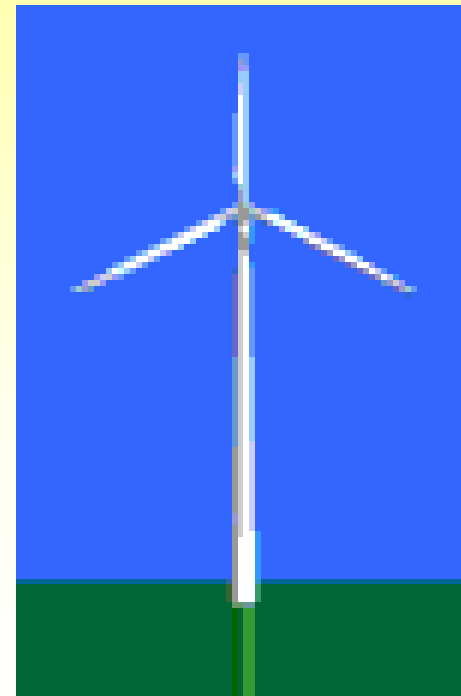


# GENERATORI EOLICI

## ROTORE: configurazione delle pale

Fermo restando altre possibilità, negli aerogeneratori moderni prevalgono tre tipi di configurazione:

- **Rotori tripala:** con tre pale montate a  $120^\circ$  l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico di circa 30 rpm, è la configurazione più usata perché, se pur a fronte di costi di trasporto e di costruzione maggiori, è quello che il miglior rapporto costi/potenza sviluppata



# GENERATORI EOLICI

## ROTORE: configurazione delle pale

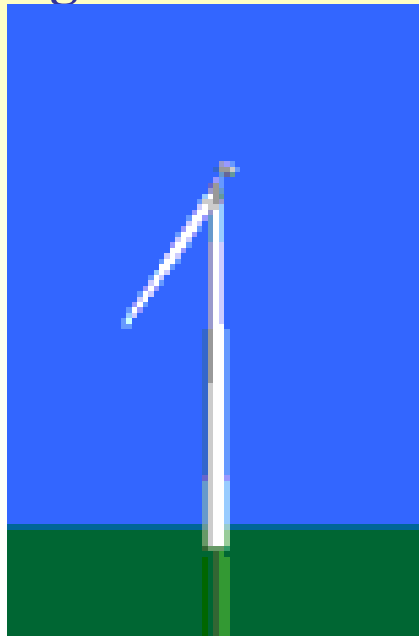
- **Rotori bipala:** con due pale montate a  $180^\circ$  l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico di circa 40 rpm.
- Ha un costo minore dei tripala ma ha una efficienza minore e risente maggiormente della presenza della torre e della velocità al suolo minore che in quota
- E' generalmente provvisto di mozzo oscillante che gli consente di equilibrare la spinta asimmetrica sul rotore.



# GENERATORI EOLICI

## **ROTORE: configurazione delle pale**

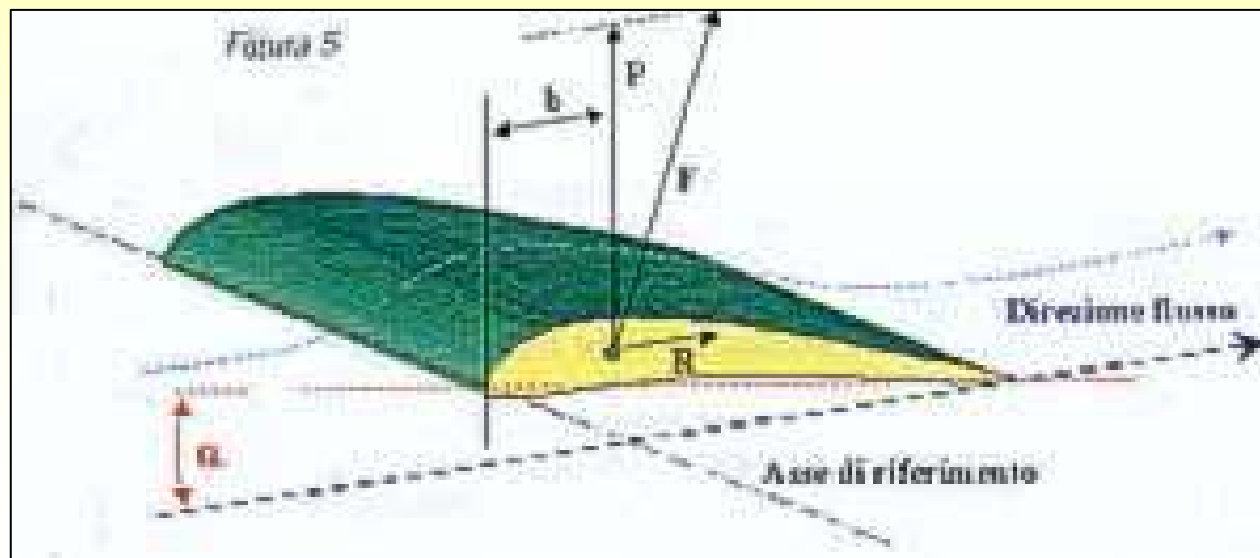
- **Rotore monopala:** con una sola pala e muniti di apposito contrappeso, è la soluzione meno costosa e quella più indicata nel caso di siti poco accessibili.
- Deve sempre essere provvisto di mozzo oscillante ed ha una efficienza generalmente minore dei multipala



# GENERATORI EOLICI

## ROTORE: configurazione delle pale

- Le pale più utilizzate sono realizzate in fibra di vetro o alluminio ed hanno un profilo simile ad una ala di aereo.
- Recentemente sono apparse sul mercato anche pale in fibra di carbonio, più leggere e rigide delle altre ma molto più costose



# GENERATORI EOLICI

## **ROTORE: regolazione del pitch**

E' chiamato "angolo di pitch", o angolo di calettamento, l'angolo che assume la pala rispetto al piano di rotazione del rotore.

Variando l'angolo di pitch è possibile regolare l'angolo di incidenza del vento sulla pala e di conseguenza effettuare una regolazione attiva della macchina.

# GENERATORI EOLICI

## **ROTORE: regolazione del pitch**

La variazione dell'angolo di pitch avviene con un meccanismo a bielle simile a quello dei rotori degli elicotteri: un attuatore idraulico posto sul rotore viene mosso in direzione assiale, un sistema di rinvii meccanici a bielle trasforma questo movimento in una rotazione di tutte le pale rispetto ai rispettivi assi longitudinali.

Con questo sistema tutte le pale assumono contemporaneamente lo stesso angolo di calettamento



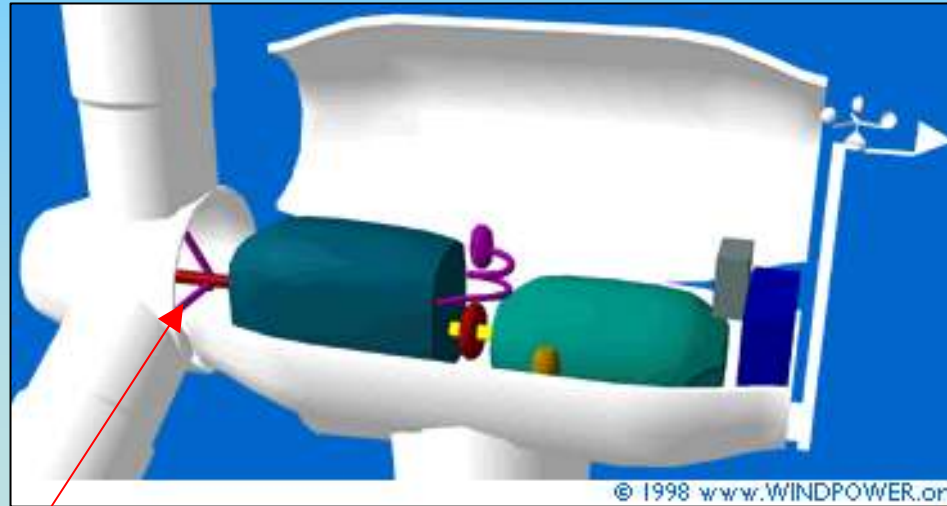
# GENERATORI EOLICI

## **ROTORE: regolazione del pitch**

Ultimamente si è sviluppato anche un sistema di regolazione del pitch formato da servomotori inseriti direttamente sulle pale.

Questo sistema consente di avere una regolazione indipendente di ogni pala, utile ad esempio per bilanciare ad ogni giro la diversa spinta del vento sulla pala quando essa si trova più vicina al suolo

# GENERATORI EOLICI



**ALBERO LENTO:** E' l'albero collegato direttamente al mozzo del rotore e gira con la stessa velocità delle pale del rotore.

E' l'albero primario del moltiplicatore di giri (quando questo è presente nella macchina) o l'albero che direttamente entra nel generatore nelle configurazioni prive di moltiplicatore (gearless).

# GENERATORI EOLICI

**TORRE DI SOSTEGNO:** ha funzione di sostegno della navicella.

Può essere costituita da un traliccio simile a quelli utilizzati per il sostegno dei cavi degli elettrodotti.

Questa soluzione ha lo svantaggio di essere strutturalmente molto rigida e di trasmettere quindi alle fondazioni tutti i carichi generati dalla navicella, particolarmente elevati in certe condizioni transitorie.



# GENERATORI EOLICI

## TORRE DI SOSTEGNO:

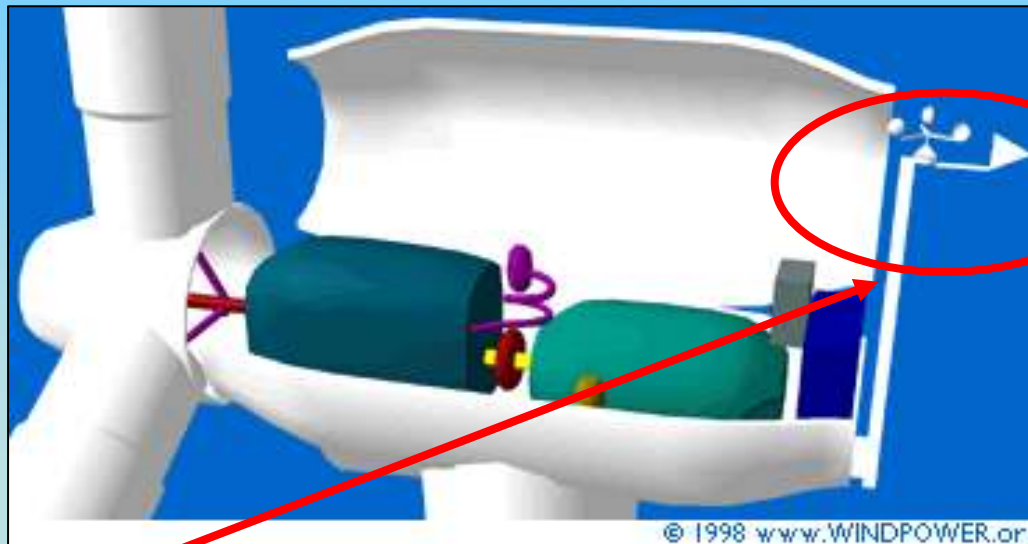
La tendenza attuale è quella di realizzare torri di sostegno a forma tubolare, molto elastiche e che riescono a "tagliare" le sollecitazioni provenienti dalla navicella, con notevoli vantaggi nella realizzazione delle fondazioni.

La torre viene realizzata con elementi componibili di forma tronco-conica, collegati con flange o ad incastro.

Alla base della torre di sostegno possono essere installate le apparecchiature di controllo e collegamento alla rete.



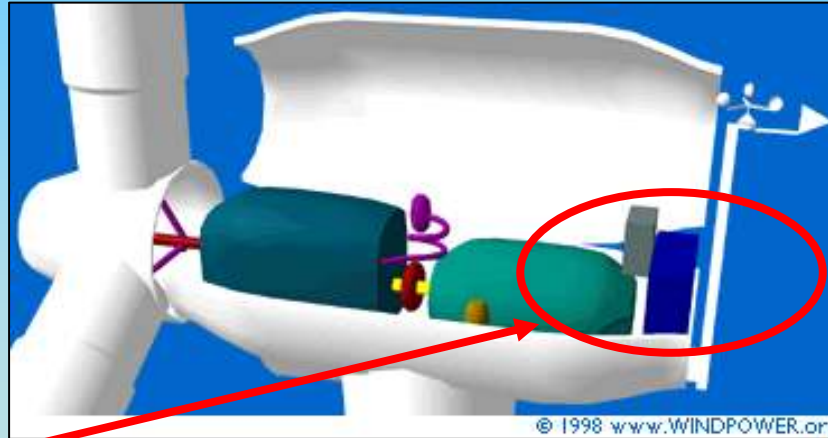
# GENERATORI EOLICI



**SISTEMI DI MISURA:** tramite il segnale di un anemometro e di una banderuola segnamento, il sistema di misura posizionato in coda alla navicella, gestisce il corretto funzionamento della macchina inviando i dati ad un processore che si occupa di variare i parametri di funzionamento principali (pitch e yaw)

Spesso i dati registrati dal sistema di misura sono teletrasmessi ad una centrale di controllo tramite rete GSM

# GENERATORI EOLICI



**SISTEMI DI CONTROLLO:** può essere posizionato sulla navicella, sulla torre o in un locale attiguo.

Il funzionamento di un aerogeneratore è gestito da un sistema di controllo che svolge due diverse funzioni.

Gestisce, automaticamente e non, l' aerogeneratore nelle diverse operazioni di lavoro e aziona il dispositivo di sicurezza che blocca il funzionamento dell'aerogeneratore in caso di malfunzionamento e di sovraccarico dovuto ad eccessiva velocità del vento.