

# PROSPETTIVE PER LA DIFFUSIONE DEL MINI-EOLICO: L'ESEMPIO DEL GENERATORE DA 5KW PROGETTATO AL DPA

D. P. Coiro°, U. Maisto°, F. Scherillo°

°Dipartimento di Progettazione Aeronautica (DPA)  
Universita' degli Studi di Napoli "Federico II"  
Via Claudio 21-80125 Napoli  
[coiro@unina.it](mailto:coiro@unina.it)  
[www.dpa.unina.it/adag/](http://www.dpa.unina.it/adag/)

## SOMMARIO

La presenza sul territorio italiano di numerosissime piccole comunita' e caschine isolate che necessitano di energia elettrica induce a pensare che esiste un grande mercato potenziale per le turbine di piccola taglia (5-10 kW). Ovviamente affinche' tali turbine possano soddisfare la richiesta di mercato e' necessario che esse presentino delle caratteristiche che le possano rendere appetibili soprattutto all'utente comune e meno esperto. Si ritiene infatti che esse debbano essere facili da installare, semplici da mantenere ed estremamente efficienti affinche' possano raccogliere sufficiente energia durante l'anno anche nei siti in cui la velocita' media del vento e' relativamente bassa. Queste sono state le linee guida che hanno portato al progetto esecutivo ed alla realizzazione (attualmente in corso) di un mini-generatore eolico ad asse orizzontale da 5kW che presenta alcuni aspetti tecnologici tali da renderlo appetibile anche all'utente medio meno esperto. Nel presente lavoro sono quindi illustrati a grandi linee il progetto e le caratteristiche peculiari di tale turbina. Il costo finale del piccolo aerogeneratore, una volta industrializzati i processi costruttivi, sar  alquanto basso rispetto alla situazione di mercato attuale. Gli sviluppi futuri prevedono ricerche volte a sviluppare nuove idee e tecnologie sia per migliorare l'efficienza complessiva del sistema sia per ridurre il rumore favorendo in tal modo la penetrazione di questo prodotto anche in ambiti che non siano solo quelli rurali.

## NOMENCLATURA

- $P$  potenza all'asse del rotore  
 $V_\infty$  velocit  del fluido indisturbato  
 $A$  superficie del disco del rotore  
 $TSR$  Tip Speed Ratio  
 $\Omega$  velocit  angolare del rotore  
 $R$  raggio del rotore  
 $I_{b+m}$  momento di Inerzia relativo all'asse di beccheggio della singola pala compresa la massa di controllo  
 $I_r$  momento di Inerzia del rotore,  
 $\sigma$  smorzamento aerodinamico  
 $k$  rigidit  della molla di contrasto  
 $M_{massa}$  momento generato dalla massa di controllo  
 $Q_{engine}$  coppia resistente del generatore elettrico  
 $M_{aerod.}$  momento aerodinamico della singola pala relativo all'asse di beccheggio  
 $Q_{aerod.}$  coppia motrice aerodinamica  
 $\theta$  angolo di beccheggio

## INTRODUZIONE

Il progetto del mini-generatore eolico su citato prevede la realizzazione di un prototipo della potenza nominale di 5 kW con una velocit  del vento pari a 9 m/s.

In particolare   stata eseguita la progettazione aerodinamica, strutturale, meccanica e dinamica del rotore e del mozzo. Per la produzione di energia elettrica e' stato previsto come alternatore, connesso al rotore senza moltiplicatore di giri, un generatore a magneti permanenti ed a flusso assiale, sviluppato nell'ambito dello stesso progetto di

ricerca. L'aerogeneratore   montato alla sommit  di un sostegno alto c.ca 18 m ed   connesso ad una piccola navicella dotata di pinna direzionale affinche' il generatore sia sempre disposto nella direzione del vento (Fig. 1).

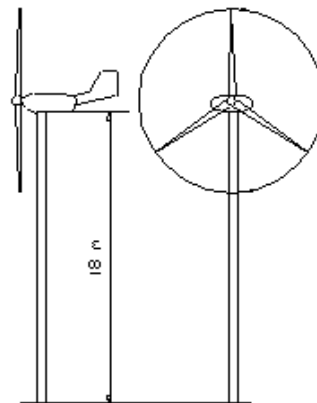


Fig. 1: Schema dell'aerogeneratore

## PROGETTO AERODINAMICO, STRUTTURALE E DINAMICO DEL ROTORE

Il progetto aerodinamico, strutturale, meccanico e dinamico del rotore e del mozzo   stato effettuato dal gruppo di ricerca ADAG ([www.dpa.unina.it/adag/](http://www.dpa.unina.it/adag/)) presso il Dipartimento di Progettazione Aeronautica (D.P.A.) dell'Universit  di Napoli "Federico II" ed esso e' stato parzialmente finanziato nell'ambito di un P.O.R. della Regione Campania in collaborazione con l'Elettrosanno S.n.c. di Pietralcina, BN.

Nella progettazione sono stati utilizzati sia dei software specifici sviluppati presso il DPA sia software commerciali acquistati; in particolare sono stati usati i seguenti codici di calcolo:

- **Aerodinamici**

*PROPID*: Codice sviluppato presso Univ. of Illinois-USA – Analisi/Design rotore

*ELICA*: Codice sviluppato presso il DPA – Analisi/Design rotore basato sulla teoria di Glauert, vedi [1],[2]

*PALOPT*: Codice sviluppato presso il DPA – Ottimizzazione geometria pale

*TBVOR* [3], [4], [5]: Codice sviluppato presso il DPA – Analisi profili alari costituenti le pale in condizioni di stallo e post/stallo

- **Strutturali**

*NASTRAN*: Disponibile presso il DPA - Analisi strutturale delle pale

*DYNA*: Analisi della dinamica vibratoria del rotore

*COSMOSWORK*: Tool di SolidWork

- **CAD**

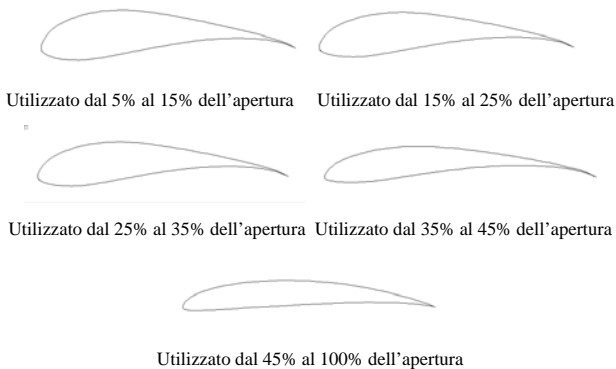
*SOLIDWORK*: Disponibile presso il DPA – Disegni CAD dei particolari e di assieme

**Design Aerodinamico**

Lo scopo del design aerodinamico, è quello di ottenere la geometria delle pale caratterizzate da un'elevata efficienza per la trasformazione della potenza del vento in potenza all'albero. In questo modo, a parità di dimensioni, un rotore efficiente avrà una produzione annua di energia maggiore, con vantaggi evidenti: si riuscirebbero a ridurre le spese di produzione di un chilowattora rendendo ancora più conveniente l'uso di queste macchine e rendendole ancora più appetibili sul mercato.

Si è quindi effettuato il design di un nuovo profilo aerodinamico ([6], [7]), appositamente sviluppato per il generatore eolico della taglia richiesta, al fine di massimizzare l'efficienza di trasformazione dell'energia del vento in energia meccanica.

Il design dei profili aerodinamici della pala del generatore si è ottenuto con l'ausilio di codici di calcolo sviluppati presso il DPA[3,4,5]. Per ottenere la desiderata efficienza aerodinamica sono stati disegnati profili *ad hoc* ottenendo così cinque diverse geometrie utilizzate in diverse stazioni della pala.



**Fig. 2: Geometrie dei profili impiegati**

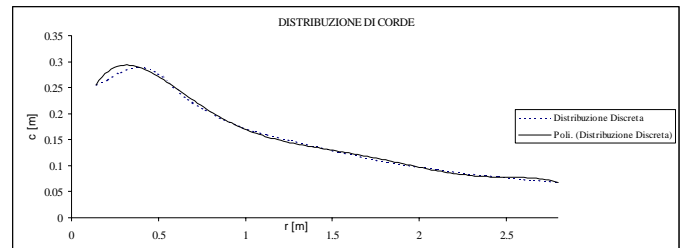
Si è poi effettuato uno studio della configurazione ottimale del rotore ai fini dell'efficienza, in termini di numero di pale, raggio e altezza da terra.

Con l'ausilio di uno specifico codice di calcolo si è giunti alla configurazione riportata nella seguente tabella:

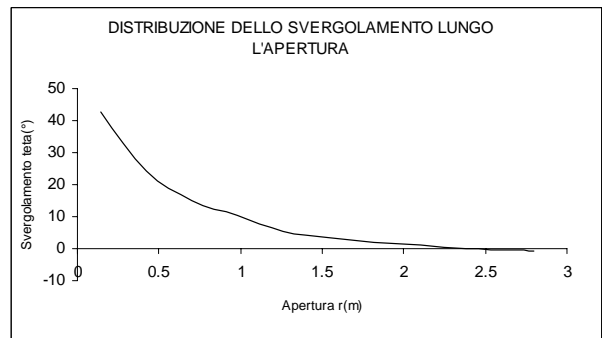
Numero di Pale	3
Raggio del Rotore	2.8 m
Altezza da terra dell'asse del Rotore	18 m

La geometria finale della singola pala è stata infine ottimizzata in termini di distribuzione delle corde e distribuzione dello svergolamento lungo l'apertura (Fig. 3, Fig. 4,

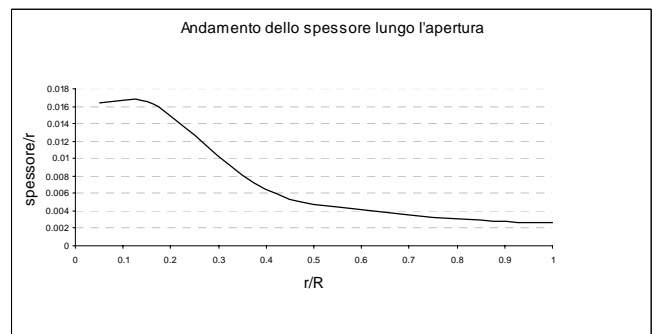
Fig. 5). L'obiettivo (punto di progetto) era quello di ottenere circa 1.5 kW con una velocità di 6.0 m/s.



**Fig. 3: Distribuzione delle corde**

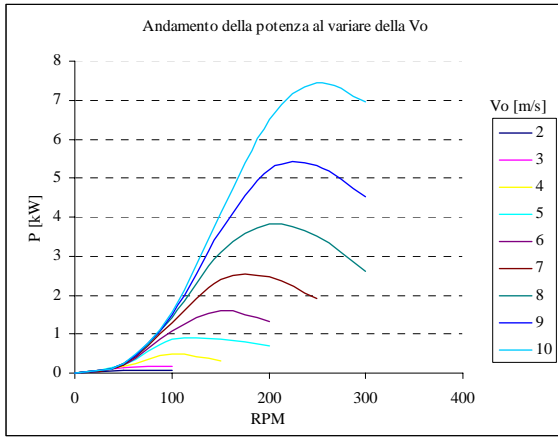


**Fig. 4: Distribuzione dello svergolamento**

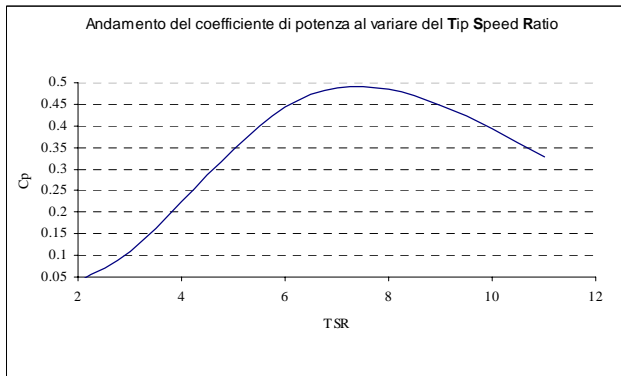


**Fig. 5: Andamento dello spessore**

Tali caratteristiche geometriche della pala permettono di ottenere le seguenti curve di potenza (Fig. 6 e Fig. 7):



**Fig. 6: Potenza in funzione del numero di giri del rotore al variare della velocità del vento**



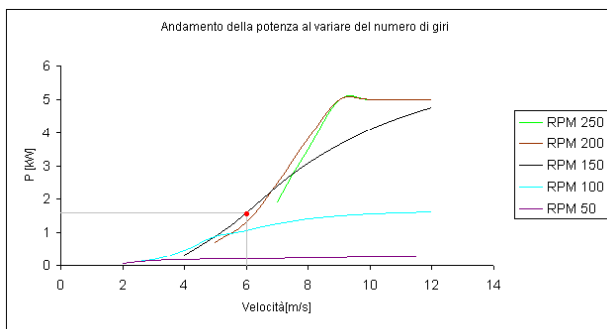
**Fig. 7: Andamento dell'efficienza in funzione del TSR**

Si noti che nel caso del grafico riportato in Fig. 7 il coefficiente di potenza  $C_p$  viene definito come:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V_\infty^3}, \text{ mentre } TSR = \frac{\Omega \cdot R}{V_\infty}. \text{ Il } C_p \text{ rappresenta}$$

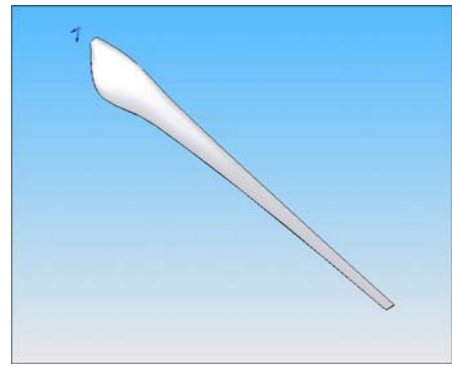
l'efficienza del rotore in quanto esprime quanta potenza si riesce a produrre rispetto a quella 'teorica' posseduta dalla corrente che investe il rotore.

La specifica prevedeva che il rotore fosse disegnato per garantire un funzionamento ottimale a basse velocità del vento, per rispondere alle esigenze di mercato connesse a zone poco ventose come quelle del bacino del Mediterraneo. In particolare era previsto che l'aerogeneratore fosse in grado di erogare una potenza di circa 1.5 kW già ad una velocità del vento di 6 m/s (punto di progetto) (Fig. 8) e raggiungesse i 5 kW alla velocità del vento di circa 9 m/s (potenza nominale).

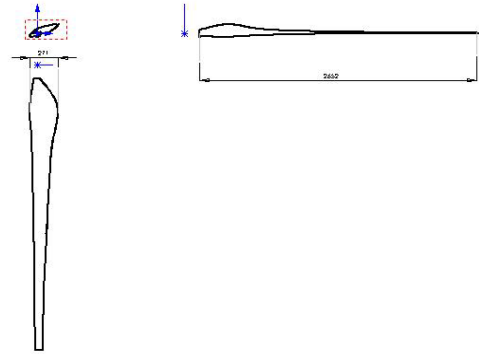


**Fig. 8: Potenza in funzione della velocità del vento ai vari numeri di giri**

Si è così disegnata la forma finale della pala (Fig. 9, Fig. 10).



**Fig. 9: Geometria della pala**



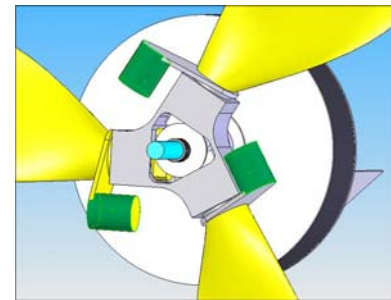
**Fig. 10: Viste coordinate della pala**

### Sistema di Controllo del numero di giri ed Analisi dinamica

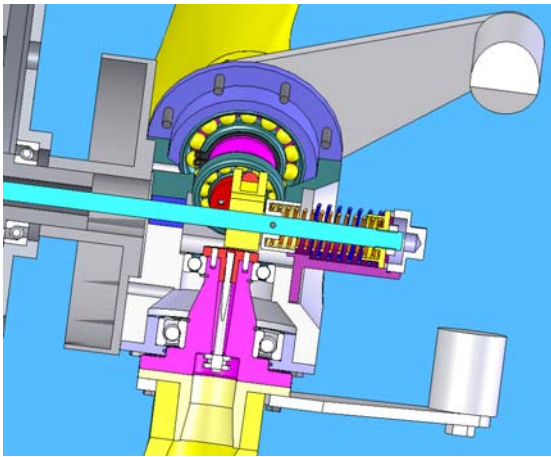
Il generatore è stato progettato per funzionare in un determinato range di numero di giri.

Onde evitare situazioni pericolose il generatore stesso è stato dotato di un sistema di controllo passivo che, qualora tali condizioni dovessero essere oltrepassate, tenda a riportare il rotore in condizioni ottimali.

Tale sistema (*Passive Stall Control*) si basa sulla disposizione di masse aggiuntive (Fig. 11) che, sotto l'effetto delle forze centrifughe, tendono a portare le pale in situazione di stallo con una conseguente diminuzione delle forze che agiscono sulle pale stesse riportando così il rotore ad un più basso numero di giri. L'effetto delle forze centrifughe è contrastato da una molla torsionale di opportuna rigidità che tende a riportare le pale in posizione di 'progetto'. Tarando opportunamente la rigidità della molla stessa si ottiene che il rotore funzioni sempre nel range del numero di giri stabilito.



**Fig. 11: Masse aggiuntive per il controllo passivo**



**Fig. 12: Spaccato del mozzo**

Particolare attenzione è stata posta alla posizione dell'asse di cerniera rispetto al quale ruota la pala.

La posizione finale di tale asse è stata determinata sia attraverso l'analisi della risposta dinamica del sistema sia attraverso l'analisi di flutter.

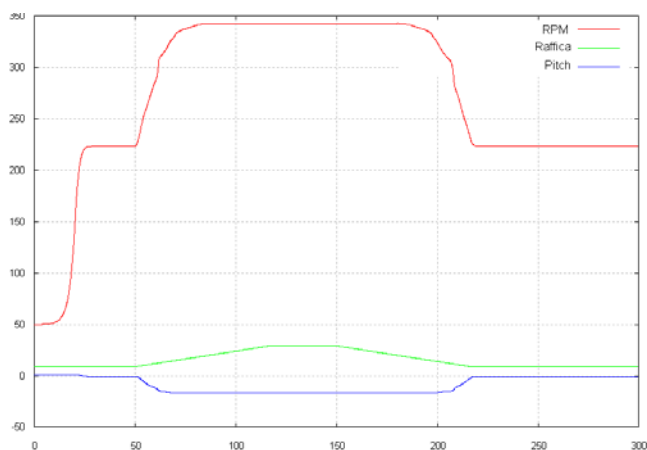
Per effettuare l'analisi della risposta dinamica è stato necessario calcolare sia l'andamento del momento aerodinamico ( $M_{aerod.}$ ) della singola pala relativo all'asse di beccheggio (*pitch*) sia la coppia motrice aerodinamica ( $Q_{aerod.}$ ) agente sul rotore al variare dell'angolo di pitch ( $\theta$ ), della velocità del vento, e della velocità angolare  $\Omega$  del rotore.

È quindi possibile scrivere il sistema d'equazioni:

$$I_{b+m} \ddot{\theta} + \sigma \dot{\theta} + k\theta = M_{aerod.}(\theta, V_{\infty}, \Omega) + M_{massa}(\theta, \Omega)$$

$$I_r \Omega = Q_{aerod.}(\theta, V_{\infty}, \Omega) - Q_{engine}$$

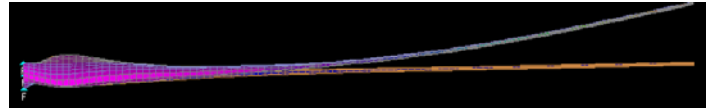
Tale sistema di equazioni è stato risolto, attraverso un codice di simulazione dinamica sviluppato presso il D.P.A, per varie posizioni dell'asse di pitch e per diverse rigidzze della molla assegnando diverse tipologie di raffica  $V_{\infty}(t)$ . In Fig. 13 si puo' vedere un esempio della risposta dinamica del sistema, in termini di RPM e angolo di pitch, per una assegnata legge temporale della raffica.



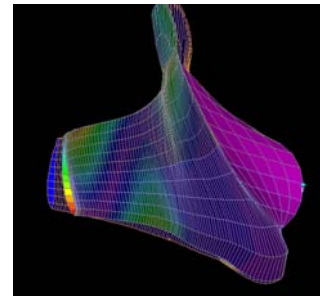
**Fig. 13: Esempio di Simulazione della Risposta Dinamica del sistema**

Per l'analisi di flutter sono stati utilizzati software specifici disponibili presso il Dipartimento allo scopo di determinare le frequenze naturali della pala necessarie per l'analisi di flutter stessa.

1° flessionale (flappeggio)	4.068 Hz
2° flessionale (flappeggio)	10.360 Hz
1° flessionale (nel piano del disco)	18.256 Hz
2° flessionale (nel piano del disco)	34.163 Hz
1° torsionale	56.799 Hz



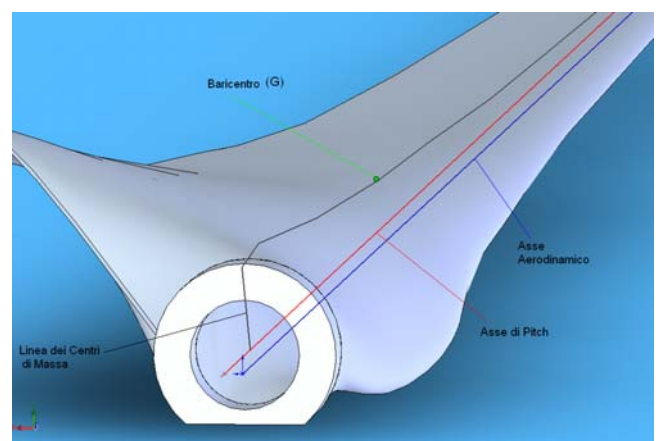
**Fig. 14 - 1° flessionale (flappeggio) 4.068 Hz**



**Fig. 15 - 1° torsionale 56.799 Hz**

Queste ultime sono state utilizzate come input ad un codice appositamente scritto presso il DPA per verificare eventuali condizioni di flutter.

Con l'ausilio dei codici descritti si è determinato, in maniera iterativa, la miglior posizione dell'asse di Pitch nonché la disposizione dei vari profili lungo l'apertura (Fig. 16)



**Fig. 16: Posizione dei vari assi**

## Analisi Strutturale

Le specifiche di progetto prevedevano un peso massimo della pala di 5 Kg e per ottenere questo requisito si è dunque

scelto di realizzare le pale in vetroresina.

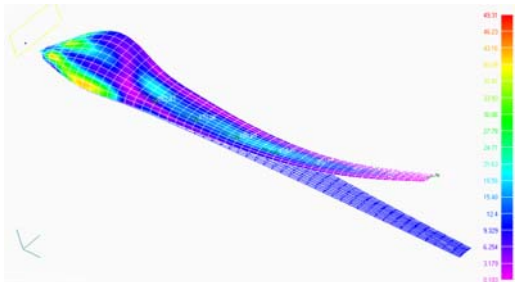
Attraverso l'utilizzo di codici disponibili presso il DPA è stato effettuato il dimensionamento strutturale della singola pala, nonché il dimensionamento strutturale della parte rotorica e statorica del mozzo.

Le condizioni di carico scelte per il dimensionamento della pala, compatibili con le norme CEI EN 61400-2, sono:

- 1) Velocità del vento di 10 m/s, 250 RPM (condizioni nominali).
- 2) Velocità del vento di 30 m/s e rotore bloccato (condizione di parcheggio con pale non a bandiera)
- 3) Velocità del vento di 30 m/s con numero di giri pari a 350 RPM.

E' opportuno sottolineare che le analisi effettuate nel caso in cui la pala era sottoposta anche a carichi dovuti alla forza centrifuga sono state effettuate nell'ipotesi di non linearità geometrica. I risultati ottenuti sono:

- 1) *deformata massima* = 433 mm,  $\sigma_{max} = 54.78 \text{ N/mm}^2$
- 2) *deformata massima* = 343 mm,  $\sigma_{max} = 12.18 \text{ N/mm}^2$
- 3) *deformata massima* = 533 mm,  $\sigma_{max} = 105.5 \text{ N/mm}^2$



**Fig. 17: Deformata massima, distribuzione delle tensioni**

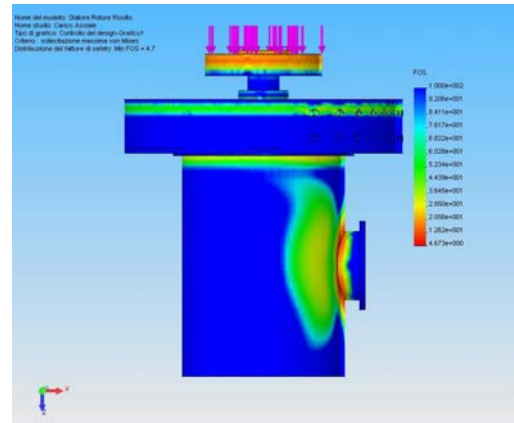
Il dimensionamento strutturale della parte rotorica e statorica del mozzo è stata effettuata con CosmosWork, un tool del programma CAD usato per il disegno (SolidWork).

In particolare la parte rotorica è stata verificata per un carico assiale di 10000 N ed un carico flessionale di 6668.5 Nm. Il primo carico è stato determinato dalla somma del carico massimo presente su ogni pala moltiplicato per il numero di pale, utilizzando un fattore di sicurezza di 1.5; il secondo considerando lo stesso carico su solo due pale (condizione sbilanciata) utilizzando lo stesso fattore di sicurezza

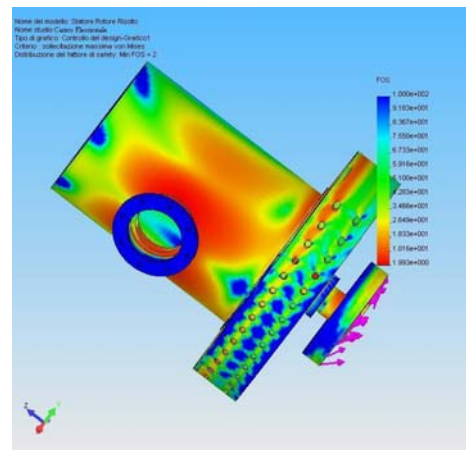
Lo stesso studio è stato effettuato sullo statore e sulla struttura assemblata. In Fig. 18 e Fig. 19 è stato riportato la distribuzione del fattore di sicurezza, inteso come

$$\frac{1}{(\sigma_{Von Mises} / \sigma_{limite})}$$

e per entrambe le condizioni di carico i valori minimi ottenuti risultano essere maggiori del fattore di sicurezza (*F.O.S* - Factor Of Safety) desiderato:  $F.O.S_{flessionale} = 1.99$ ,  $F.O.S_{assiale} = 4.67$ ,  $F.O.S_{desiderato} = 1.5$ .



**Fig. 18 Fattore di Sicurezza con Carico Assiale (Rotore+Statore).**



**Fig. 19 Fattore di Sicurezza con Carico Flessionale (Rotore+Statore).**

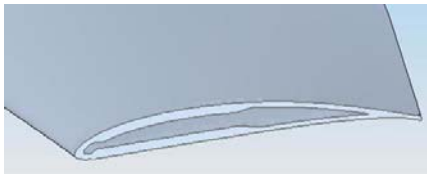
### Materiali e tecnologie per la costruzione delle pale

Il tipo di struttura della pala è un guscio con degli ispessimenti longitudinali dello stesso materiale, (Fig. 20).

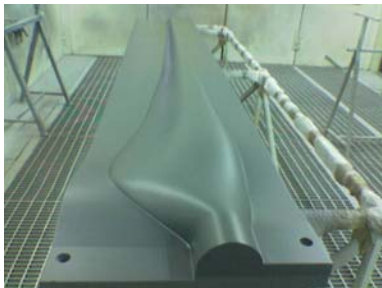
La scelta del materiale per realizzare le pale del generatore eolico è stata dettata dalle specifiche di progetto che prevedevano un peso massimo della pala di 5 Kg, per questo si è scelto, come già detto, il materiale composito. Per ottimizzare i costi delle pale si è scelta la combinazione di fibre di vetro con resina epossidica. Ovviamente la stratificazione del materiale è stata ottimizzata per minimizzare il materiale impiegato cercando di soddisfare alle esigenze strutturali sia in termini di tensioni ammissibili sia in termini di deformate massime. Tali materiali permettono di ottenere ottime caratteristiche meccaniche, con un risparmio in peso che può toccare anche il 70% rispetto ai materiali tradizionali.

Per la realizzazione delle pale in composito è stato costruito prima uno stampo maschio con macchina a controllo numerico per ottenere le tolleranze richieste (Fig. 21) e poi si è realizzato uno stampo femmina in resina sul quale sono state stratificate le pale. Sono in corso le prove statiche delle pale realizzate.



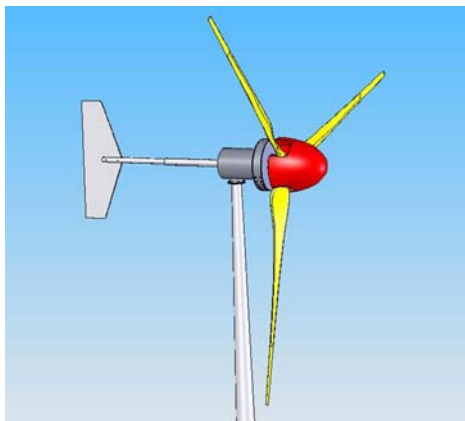


**Fig. 20 : Distribuzione degli spessori dello skin**



**Fig. 21: Stampo maschio**

La turbina completa e' riportata in figura 22.



**Fig. 22 Assieme dell'Aerogeneratore**

## CONCLUSIONI

La progettazione della turbina si è svolta secondo le seguenti fasi:

1. Il progetto preliminare del rotore affinché questo produca almeno 1.5 kw elettrici per una velocità media del vento di 6 m/s ed in condizioni di regime (9 m/s) produca 5 kw
2. Il progetto dettagliato dei profili costituenti le singole pale (3 pale complessivamente)
3. L'ottimizzazione della distribuzione di corde e dei calettamenti
4. L'analisi aerodinamica e strutturale del rotore completo
5. L'ottimizzazione strutturale della pala (scelta degli strati e dell'orientamento del composito)

6. Il progetto meccanico del sistema automatico di controllo della velocità di rotazione del rotore in presenza di venti forti
7. L'analisi aeroelastica del rotore e delle singole pale
8. Il progetto dell'accoppiamento rotore-generatore elettrico

I principali risultati dell'attività di progettazione e le predizioni numeriche sono state riportate nei precedenti paragrafi del presente lavoro. L'efficienza del rotore è stimata essere di circa il 45% alla velocità nominale di progetto.

Sono in corso le prove statiche sulla pala e le sperimentazioni sul campo serviranno per verificare la bontà e l'accuratezza sia di tutto il progetto sia delle analisi teorico/numeriche effettuate i cui risultati sono stati riportati nei paragrafi precedenti. Lo sviluppo di tale ricerca è diretto sia alla riduzione del rumore sia all'installazione di un eventuale diffusore che incrementi significativamente l'efficienza globale del sistema: entrambi i miglioramenti potranno favorire la diffusione del mini-eolico in ambiti non esclusivamente rurali.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Eggleston, D.M. and Stoddard, F.S., Wind Turbine Engineering Design, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1987.
2. Ceriello, A., Ottimizzazione aerodinamica del rotore dei generatori eolici ad asse orizzontale, tesi di laurea presso il DPA, vincitrice del primo premio del concorso nazionale dell'ENEA dal titolo 'Sviluppo Sostenibile '99', A.A. 1998/1999
3. Coiro, D.P. and de Nicola, C., Prediction of Aerodynamic Performance of Airfoils in Low Reynolds Number Flows, Low Reynolds Number Aerodynamics Conference, Notre Dame, USA, 1989
4. D.P. Coiro, P. Dini, Stall and Post-Stall Performance Prediction of Advanced Wind Turbine Airfoils, XII Congresso Nazionale AIDAA, Como, Luglio 1993
5. Coiro, D.P. and Dini, P., The Prediction of Aerodynamic Stall Over Wind-Turbine Airfoils, International Conference on fluid and thermal energy conversion Yogyakarta, Indonesia, 1997
6. G. Cerbasi, Analisi Sperimentale di una Piccola Turbina Eolica e Design Aerodinamico di un Rotore da 5 kW, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Napoli Federico II Dipartimento di Progettazione Aeronautica A.A 2002/2003.
7. A. Nicoli, Ottimizzazione Aerodinamica e Test in Galleria del Vento di una Turbina Eolica ad Asse Orizzontale, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Napoli Federico II Dipartimento di Progettazione Aeronautica A.A 2001/2002.