



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CHIMICA, GESTIONALE, INFORMATICA, MECCANICA

Dottorato di ricerca, XXIX Ciclo

Evoluzione di una turbina eolica innovativa

Dottorando

Ing. Eugenio Giovannelli

Tutor

Prof. Antonio Pantano

Coordinatore del Dottorato

Prof. Salvatore Gaglio

SOMMARIO

All'interno del panorama delle fonti energetiche rinnovabili la generazione eolica è in assoluto tra le più interessanti soprattutto laddove le caratteristiche di ventosità dei siti ben si sposano con le specificità costruttive delle turbine.

L'attività oggetto del presente dottorato è legata allo sviluppo del brevetto e dei prototipi dimostrativi realizzati. In particolare, nel seguito di questa relazione verranno analizzati i limiti fisiologici di tale progetto e verranno presentate le ipotesi di evoluzione.

Lo scopo della presente attività di ricerca è di studiare le prestazioni delle turbine Savonius e Darrieus e proporre una nuova configurazione a geometria variabile che sintetizzi le potenzialità di ognuna. L'idea è quella di mantenere le caratteristiche migliori di entrambe le configurazioni, ma riducendo nettamente il fenomeno dell'interferenza aerodinamica. Il progetto prevede lo sviluppo di una turbina Darrieus con pale mobili e una Savonius interna a scomparsa.

I vantaggi nel realizzare questo tipo di turbina sarebbero:

- 1 - La possibilità di ottimizzare la Darrieus nella sua migliore configurazione a regime, in quanto viene portata in rotazione dalla Savonius;
- 2 - la possibilità di far lavorare la turbina in un range molto ampio di velocità del vento, infatti anche con venti deboli, la turbina può rimanere in configurazione Savonius variabile.

Le principali difficoltà sono relative alle seguenti tematiche:

- 1- Evitare o quantomeno limitare le interferenze aerodinamiche dovute all'interazione delle due geometrie variabili;
- 2- Ottimizzare le cinematiche di movimento delle pale in maniera tale da non avere fenomeni di resistenza aerodinamica durante ciascuna rotazione completa dell'albero di supporto verticale;
- 3 - Semplificare il cinematismo per ridurre i pesi delle masse sospese in movimento.

In una prima fase di ricerca si sono studiati gli effetti generali dei sistemi ibridi e si è ipotizzata una prima configurazione che mantenga la struttura variabile della turbina Savonius ed a questa aggiunga delle pale fisse di tipo Darrieus. Successivamente si è integrato un sistema a pale mobili anche sulla turbina Darrieus che funziona in maniera coordinata con quanto già progettato. Gli strumenti utilizzati sono applicativi multibody (Adams) utili a simulare il comportamento cinematico dei componenti principali della turbina, programmi CAD (Solid Works), software come Fluent ed Xfoil sono stati utilizzati per le analisi fluidodinamiche, mentre quelle strutturali sono state realizzate utilizzando software FEM (Ansys).

INDICE

SOMMARIO.....	2
INDICE.....	3
INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 1.....	5
L'energia eolica e le tipologie di turbine	5
CAPITOLO 2.....	23
Le analisi preliminari	23
CAPITOLO 3.....	33
Il progetto preliminare	33
CAPITOLO 4.....	52
Il modello definitivo	52
CAPITOLO 5.....	65
Il prototipo.....	65
.....	87
CAPITOLO 6.....	88
Le conclusioni.....	88
Riferimenti bibliografici.....	99

INTRODUZIONE

L'eolico è una risorsa che per essere sfruttata necessita di sistemi in grado di "imbrigliare" il vento, sottraendogli parte della sua energia cinetica per convertirla in energia meccanica; quando si ottiene energia meccanica di rotazione di un albero si parla di aeromotori e nel caso specifico in cui l'albero posto in rotazione è quello di un generatore di elettricità si parla di aerogeneratori.

Tra gli aerogeneratori si possono distinguere due grandi categorie; in base alla disposizione dell'asse di rotazione si individuano macchine ad asse orizzontale e macchine ad asse verticale a seconda se l'asse è rispettivamente parallelo o perpendicolare alla direzione del vento.

In realtà esistono anche alcune soluzioni innovative per l'estrazione di energia da un flusso ventoso che non rientrano in nessuna delle due categorie sopra citate e che ancora non hanno ricevuto forte sviluppo in quanto presentano parti sospese in aria e collegate a terra tramite dei cavi.

La maggior parte delle turbine è progettata per generare la massima potenza ad una prefissata velocità del vento. Questa potenza è nota come "rated power" e la velocità del vento a cui viene raggiunta è detta "rated wind speed". Le prime turbine realizzate sia orizzontali sia verticali utilizzano un generatore asincrono che presenta la costanza della frequenza, parametro indispensabile per l'immissione di elettricità nella rete elettrica, indipendentemente dalla velocità di rotazione delle pale (purché essa sia superiore a quella di sincronismo); questa sembrerebbe la scelta più naturale per un impiego del genere, vista la non costanza della velocità di rotazione. Lo svantaggio risiede nella necessità di adoperare un moltiplicatore di giri molto costoso, fonte di molto rumore che introduce perdite meccaniche e possibilità di rotture ma conferisce al tempo stesso il vantaggio di non utilizzare un generatore enorme, per le troppe coppie polari, ed evita alle pale di dover ruotare troppo velocemente.

Ultimamente si realizzano turbine che prevedono un generatore sincrono spesso a magneti permanenti, che si trova però a generare elettricità a frequenza del tutto variabile. Se questo poteva apparire un impedimento insormontabile anni addietro (infatti le turbine ad asse orizzontale con generatore sincrono erano più costose e più pesanti rispetto a quelle con generatore asincrono), con l'evolversi dei dispositivi soprattutto in termini di potenze, costi e peso è risultato molto più naturale e vantaggioso disporre di questi generatori affiancati da un raddrizzatore e da un inverter, che provvedono a raddrizzare in ingresso la corrente a frequenza variabile, trasformandola in continua e operando una nuova riconversione da continua in alternata a frequenza di rete.

CAPITOLO 1

L'energia eolica e le tipologie di turbine

1.1 Il Vento: teorie di base

Il vento ha rappresentato per millenni una forma di energia locale di facile trasformazione; esempi come i mulini o le barche a vela ci testimoniano come l'uomo già nel 2000 A.C. avesse compreso la sua grande importanza.

L'origine del vento è da attribuire all'azione del sole che riscaldando in modo differenziato le varie zone della terra genera dei gradienti di pressione: le zone più calde della superficie terrestre cedono infatti maggiore calore all'aria che le sovrasta generando un aumento del suo volume con conseguente diminuzione della pressione.

A livello globale a causa di una temperatura maggiore nella zona equatoriale e minore man mano che ci si avvicina ai poli si generano dei moti convettivi ascendenti nella zona dell'equatore e discendenti ai poli; a questi moti bisogna sommare la rotazione terrestre e le variazioni stagionali dell'irraggiamento solare ottenendo così quello che viene definito "vento globale".

Uno dei modelli più semplici per descrivere il moto del vento tiene conto di 4 forze:

- Forze di pressione
- Forza di Coriolis
- Forza di inerzia dovuta al moto circolare di larga scala
- Forze d'attrito con la superficie terrestre

La forza di pressione per unità di massa è data da:

$$F_p = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1)$$

Mentre la forza di Coriolis per unità di massa è:

$$F_c = fU \quad (2)$$

con U =velocità della Terra e $f = 2\omega\sin(\Phi)$ e Φ =latitudine

Il risultato di queste due forze è il “vento geostrofico” che tende ad essere parallelo alle isobare.

A causa delle aree di alta e bassa pressione le isobare si incurvano il che fa pensare alla presenza di una forza centrifuga che produce il cosiddetto “vento di gradiente” che è pari a:

$$U_{gr} = U_{gr} - \frac{U_{gr}^2}{fR} \quad (3)$$

Infine le forze d'attrito con la superficie della terra provocano un rallentamento del vento il cui effetto diminuisce man mano che ci si allontana dalla superficie fino a diventare trascurabile nel cosiddetto strato limite. Il modello matematico più usato per ottenere l'andamento della velocità del vento in funzione dell'altezza è il modello logaritmico (Wortman 1982) ricavato da considerazioni fluidodinamiche sull'andamento delle tensioni di taglio tra i vari strati d'aria che fornisce:

$$U(z) = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

Dove:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (5)$$

Con:

τ_0 =valore superficiale della tensione di taglio

z_0 =dimensione della rugosità della superficie

k =costante di Von Karman (pari a 0,4)

Il modello trovato è valido per una sfera omogenea per cui esso dovrà essere corretto per tenere in considerazione la superficie irregolare e la distribuzione di terra e acqua che generano variazioni di pressioni.

Questa tipologia di circolazione del vento è inoltre di tipo globale; secondo Rohagi e Nelson bisogna poi considerare altri due livelli di circolazione: la circolazione secondaria e quella terziaria.

La circolazione secondaria include uragani, monsoni e cicloni extratropicali mentre quella terziaria include brezza di terra e di mare, venti di vallata e di montagna, venti di Foehn, temporali e tornado.

Analizzate le origini e trovato un modello generale per descrivere il vento passiamo ad analizzare l'energia da esso posseduta.

L'energia del vento è energia di tipo cinetico, legata quindi alla velocità della massa d'aria in moto per cui avrà una forma del tipo:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (7)$$

Considerando come volume di controllo un tubo di flusso e sostituendo l'energia E con la potenza P e la portata massiva M, vale a dire la massa per unità di tempo, al posto della massa scalare m, si ottiene:

$$P = \frac{1}{2}Mv^2 \quad (8)$$

Poiché all'interno tubo di flusso la densità si ipotizza costante possiamo porre:

$$M = \rho Q = \rho vA \quad (9)$$

essendo A l'area trasversale del tubo di flusso.

Sostituendo la (8) nell'espressione (9) otteniamo il valore teorico della potenza posseduta da una corrente di fluido avente una densità ρ che fluisce con velocità v all'interno di un tubo di flusso avente un'area trasversale A:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (10)$$

Come possiamo osservare dalla relazione (5) la potenza risulta essere una funzione cubica della velocità del vento, per cui un piccolo incremento della velocità produce un aumento considerevole della potenza.

1.2 La teoria di Betz

Le macchine utilizzate per estrarre l'energia dal vento sono le turbine eoliche, che dalla loro forma più arcaica presente negli antichi mulini fino alle più moderne e immense macchine con cui vengono costruiti i parchi offshore conservano la fondamentale caratteristica di spillare energia cinetica attraverso delle pale che mettono in rotazione un albero.

Analizziamo quindi il funzionamento di una turbina usando il principio di conservazione del momento.

Considerato un tubo di flusso avente al suo interno un disco palettato e considerate le seguenti ipotesi:

- fluido omogeneo, incomprimibile e flusso a regime
- resistenze d'attrito nulle
- numero di palette infinito
- spinta uniforme sul disco
- scia non rotante
- pressione statica distante a monte e a valle del rotore costante e pari alla pressione ambiente

è possibile applicare il principio di conservazione del momento secondo cui la spinta T che il flusso d'aria genera sul disco palettato è uguale e opposta alla variazione del momento del flusso d'aria:

$$T = U_1(\rho AU)_1 - U_4(\rho AU)_4 = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2) \quad (11)$$

Moltiplicando per la velocità del disco si ottiene la potenza:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2(U_1^2 - U_4^2)V_2 \quad (12)$$

Introduciamo il fattore di induzione assiale definito come il decremento frazionale della velocità del vento tra l'ingresso del tubo di flusso e la sezione del rotore :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (13)$$

La potenza può essere riscritta come:

$$P = \frac{1}{2}\rho AU^3 4a(1 - a)^2 \quad (14)$$

Possiamo infine definire il coefficiente di potenza come il rapporto tra la potenza prodotta dalla turbina e quella relativa al vento:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} \quad (15)$$

Ponendo in funzione di a si ottiene:

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (16)$$

Da questa derivando e ponendo la derivata uguale a zero è possibile calcolare il valore massimo che può assumere C_P ottenuto per $a = 1/3$ che risulta pari a:

$$C_{P,\max} = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (17)$$

Da ciò si evince che affinché la turbina lavori in condizioni ottimali la velocità del vento nel rotore deve essere circa pari a $2/3$ della velocità del vento fuori dal tubo di flusso.

Parallelamente al fattore di potenza può essere calcolato il fattore di spinta pari al rapporto tra la spinta generata sulla pala e la forza relativa al flusso del vento:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (18)$$

Questo fattore parte da zero, raggiunge il valore massimo di 1 quando $a=0,5$ in cui si ha che il fluido risulta fermo subito dietro il rotore e poi torna a zero.

Il valore di $C_{P,\max} = \frac{16}{27} = 0,5926$ è denominato limite di Betz e rappresenta il valore teorico massimo che può raggiungere C_P ; tuttavia questo limite non risulta raggiungibile a causa della rotazione della scia dietro il rotore, del numero finito di palette e della presenza di perdite aerodinamiche.

Consideriamo ora che la scia dietro il rotore ruoti in verso opposto alla rotazione del rotore.

La generazione di energia cinetica rotazionale nella scia comporta un abbassamento nell'energia che può essere estratta dal rotore; maggiore è la coppia generata dal rotore e maggiore risulta l'energia cinetica rotazionale posseduta dalla scia e di conseguenza maggiori saranno le perdite dovute alla rotazione della scia.

Applicando il principio di conservazione del momento angolare possiamo ricavare un'espressione per il calcolo del momento torcente:

$$dQ = dm(\omega r)(r) = (\rho U_2 2\pi r dr)(\omega r)(r)$$

E da questa si ricava l'espressione della potenza che è:

$$dP = \Omega dQ$$

$$dP = \frac{1}{2} \rho A U^3 \left[\frac{8}{\lambda^2} a' (1 - a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right]$$

In cui:

$a' = \omega/2\Omega$ fattore di induzione angolare

ω velocità angolare impartita al flusso

Ω velocità angolare del rotore

$\lambda = \Omega R/U$ rapporto tra la velocità massima (esterna) del rotore e quella del vento (tip speed ratio);

$\lambda_r = \Omega r/U$ rapporto tra la velocità locale del rotore e quella del vento (local speed ratio).

1.3 La classificazione delle turbine eoliche

La classificazione fondamentale delle turbine eoliche viene fatta sulla base del loro asse di rotazione; si distinguono quindi:

- Turbine ad asse orizzontale
- Turbine ad asse verticale

Le turbine ad asse orizzontale si dividono ulteriormente in tre classi:

- mulini a vento classici,
- turbine lente,
- turbine veloci.

I mulini a vento, macchine antichissime, assolvono il più delle volte compiti di pompaggio; sono caratterizzati da valori di $CP < 0.3$ medio-bassi.



Figura 1.1 - Mulino a vento: il primo esempio di turbina eolica

Le turbine lente hanno valori ottimali del rapporto di funzionamento λ pari a 1 e sono caratterizzate da un elevato numero di pale e un elevato CP. Le potenze ottenibili sono basse, ma l'elevato valore della coppia allo spunto le rende molto pratiche consentendo una semplice e facile partenza.



Figura 1.2 - Turbina ad asse orizzontale lenta

Le turbine veloci presentano invece un rapporto di funzionamento ottimale pari a 5 e hanno un numero di pale compreso tra 1 e 4. Grazie a un elevato coefficiente di potenza e un'alta velocità di rotazione sono le più adatte della famiglia ad essere utilizzate per generare energia elettrica.



Figura 1.3 - Turbina ad asse orizzontale veloce

Le turbine ad asse verticale sono invece caratterizzate principalmente dalla loro indipendenza dalla direzione del vento che permette loro di lavorare con vento proveniente da tutte le direzioni senza doversi ruotare per allinearsi. Esse si dividono ulteriormente in due sottogruppi:

- Turbine di tipo Savonius
- Turbine di tipo Darrieus

Le turbine di tipo Savonius, dette anche drag turbine, sono delle turbine che lavorano a resistenza e funzionano sfruttando la differenza di resistenza aerodinamica tra due bracci che girano intorno al proprio asse. Presentano una elevata coppia di spunto ma un basso rapporto di funzionamento ottimale.



Figura 1.4 - Turbina Savonius

Le turbine di tipo Darrieus, dette invece lift turbine sono invece caratterizzate da profili alari verticali che lavorano a portanza riuscendo quindi ad ottenere rapporti di funzionamento ottimali maggiori di 1 e quindi in definitiva migliori coefficienti di potenza. Sono tuttavia affette dal problema di avere una bassa coppia all'avviamento che comporta loro l'impossibilità di autoavviarsi a basse velocità del vento.



Figura 1.5 - Turbina Darreius

In generale le turbine ad asse orizzontale lavorano meglio di quelle ad asse verticale in condizioni di flusso poco turbolento e con direzione costante mentre, viceversa, le turbine ad asse verticale lavorano meglio se il flusso è caratterizzato da elevata turbolenza e frequenti cambi di direzione.

C'è inoltre un ulteriore fattore discriminante tra le due famiglie di turbine: il rumore. Le turbine ad asse orizzontale risultano infatti molto più rumorose rispetto alle turbine ad asse verticale a causa della minore velocità di rotazione e dalla configurazione stessa: il rumore prodotto dalla pala durante la rotazione e soprattutto nel passaggio sopravvento al palo risulta ben più fastidioso rispetto al rumore più acuto ma continuo e meno potente delle turbine ad asse verticale.

Per i motivi sopraesposti solitamente si preferisce installare turbine ad asse orizzontale in luoghi non abitati, soprattutto sulle cime delle montagne e in mare mentre si installano sempre più frequentemente turbine ad asse verticale in zone abitate o comunque prossime ad un'abitazione.

1.4 La turbina Savonius

Sono turbine a resistenza ad asse verticale inventate da un ingegnere finlandese Sigurd Savonius. La loro realizzazione è molto semplice e prevede due semicilindri fissati a un albero centrale e montati in opposizione.

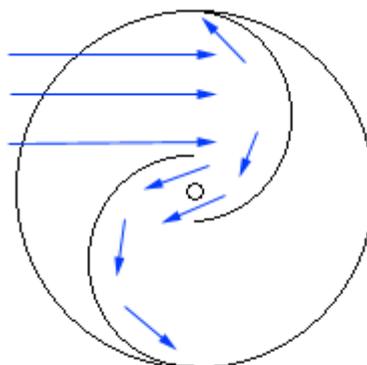


Figura 1.6 - Schema di funzionamento turbina Savonius

Il vento andando a impattare su un semicilindro mette in rotazione tutto

l'albero, in questo modo mentre un semicilindro vede lentamente ridurre la vena fluida che lo colpisce, quello opposto vede incrementare tale vena. A questo punto il processo si ripete dando luogo ad una rotazione continua.

Il principale problema di tale tipo di macchine, che ne limita le prestazioni, è di avere un semicilindro che si muove controvento limitando la coppia che può essere prodotta, però come tutte le macchine verticali non ha bisogno di essere orientato al vento per funzionare in modo ottimale.

1.5 Il Panemone

Il panemone, in modo analogo alla turbina Savonius, funziona grazie alla resistenza offerta dai suoi pannelli; il vento colpendo ogni pannello lo mantiene a battuta contro un supporto fisso (un fermo) così da generare una coppia che pone in rotazione tutta la struttura.

Ogni singolo pannello possiede un grado di rotazione attorno ad un perno cosicché quando viene a trovarsi sottovento la spinta della vena fluida lo fa ruotare attorno a tale perno disponendolo parallelo alla direzione del flusso, senza produrre quella resistenza che si ha nella Savonius dovuta al semicilindro che si muove controvento.

Durante la rotazione, dopo mezzo giro dal punto in cui il pannello si è orientato parallelo al vento, viene a trovarsi di nuovo contro il fermo e quindi è in posizione utile per generare una coppia motrice.

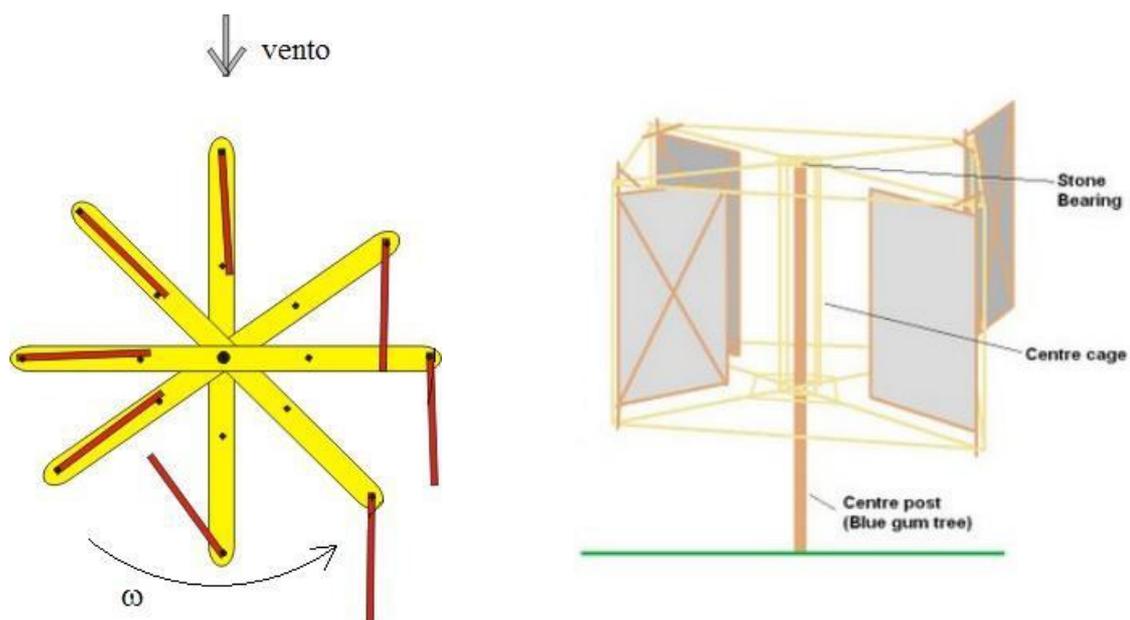


Figura 1.7 - Schema di funzionamento del Panemone

Va sottolineato come il tutto avvenga senza l'utilizzo di dispositivi elettronici, ma in modo semplicemente meccanico.

L'uso del panemone potrebbe sembrare redditizio rispetto ad una Savonius, essendo minima la resistenza aerodinamica delle parti che si muovono controvento, ma va detto che, mentre un panemone utilizza come superficie resistente utile a generare coppia motrice un pannello piatto, la Savonius utilizzando una forma semicircolare ottimizza tale coppia; quindi se da un lato la Savonius ha l'inconveniente di ridurre la potenza prodotta a causa dei movimenti controvento dall'altro il semicilindro è più efficiente nello sfruttare la vena fluida rispetto a un pannello. Occorre inoltre sottolineare come il panemone, per via del numero elevato di pale mobili, presenta notevoli problemi di stabilità dinamica essendo soggetto a forti vibrazioni che, trasmesse all'albero, ne minano il comportamento generale.

1.6 La turbina Darrieus

Le Turbine Darrieus sono turbine ad asse verticale basate sul principio della portanza, brevettate da George Darrieus nel 1931, sono in grado di produrre potenza al pari e anche maggiore delle migliori turbine ad asse orizzontale attualmente in grandissima diffusione. Il nome Darrieus si riferisce a tre classi di turbine ad asse verticale: le "eggbeater", "H-type", e la Darrieus elicoidale che si differenziano tra di loro solo per la forma delle pale, ma tutte funzionano sfruttando la portanza creata dal profilo palare.

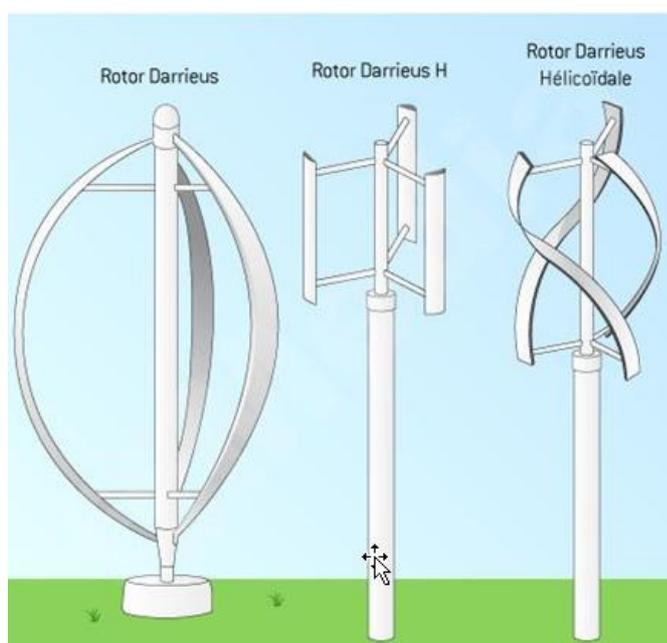


Figura 1.8 - Tipologie di configurazione Darrieus

Le turbine Darrieus sarebbero molto più comuni oggi se non fosse per un enorme difetto: affinché la portanza sviluppata sulle pale sia in grado di movimentare il generatore, il rotore deve essere portato a una velocità minima; in altri termini una tale turbina non è in grado di avviarsi.

A dire il vero, una turbina con un numero di pale superiore a uno si potrebbe avviare in qualsiasi posizione (solo una turbina Darrieus monopala presenta alcune posizioni in cui non si avvia autonomamente), ma il problema è che questo si verifica solo con grandi velocità del vento e in condizioni ideali. A volte neppure un forte vento è sufficiente a metterla in movimento a causa degli attriti e delle vorticità che generandosi attorno a un profilo si prolungano sulle pale successive e ne disturbano l'efficienza. Quindi nella pratica si rende necessario un meccanismo di partenza.

Per superare il problema appena descritto esistono diverse soluzioni, una delle quali consiste nel montare un dispositivo a resistenza (una turbina Savonius) all'interno di una turbina Darrieus esistente. Questa Savonius dovrebbe avere una forma tale da creare abbastanza resistenza per poter muovere velocemente le pale della Darrieus finché queste non sono in grado di produrre sufficiente portanza per auto - movimentarsi e a quel punto l'avviatore sarebbe disaccoppiato.

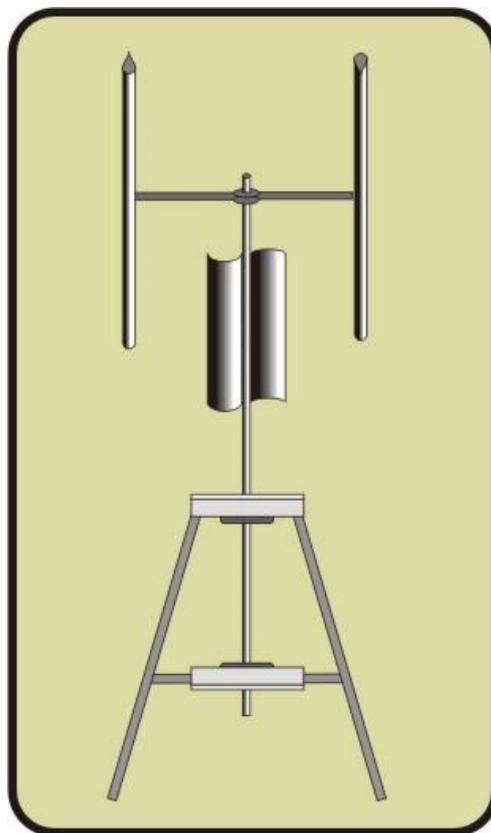


Figura 1.9 - Turbina ibrida Savonius-Darrieus

Un altro sistema per l'avviamento consiste nell'utilizzare elettricità per portarsi nella condizione di auto sufficienza; sebbene questo metodo sia funzionante, non sempre è desiderabile, in quanto la turbina deve essere collegata ad una centrale elettrica e nel caso in cui essa venga usata per il pompaggio dell'acqua è un grosso inconveniente mancando il generatore, inoltre complica notevolmente il design della macchina limitandone l'uso solo in alcune aree (zone offshore nelle vicinanze di reti elettriche).

Le forze trainanti delle turbine Darrieus possono essere descritte in dettaglio con l'aiuto della figura seguente.

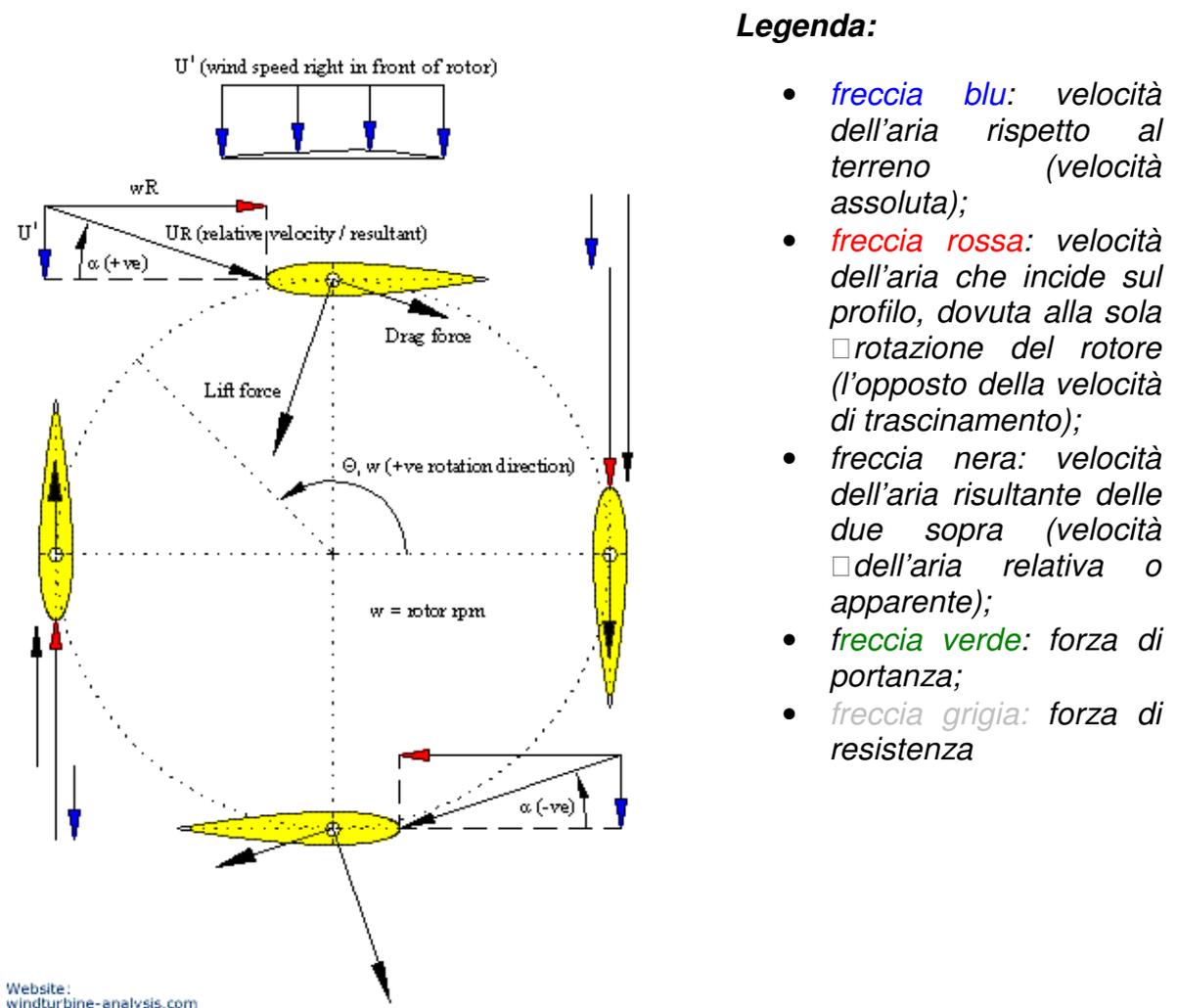


Figura 1.10 - Forze trainanti applicate alle pale di una turbina Darrieus

Ci sono due componenti di velocità importanti: la velocità del profilo alare rispetto all'albero, che è sempre parallela alla corda, di modulo pari alla velocità angolare moltiplicata per il raggio e la velocità del vento, approssimata con una velocità costante in direzione, modulo e verso. La risultante di questi due vettori è la velocità dell'aria rispetto al profilo alare, cioè la velocità apparente del vento, detta anche velocità relativa. L'angolo tra questa risultante e la corda del profilo alare si chiama l'angolo di attacco α .

Le pale che fendono l'aria sotto un certo angolo di attacco sono soggette ad una differenza di pressione, origine della forza chiamata portanza che spinge in avanti la pala.

Sempre osservando la figura, in cui sono rappresentate quattro pale con un profilo alare simmetrico, nella posizione $\theta=0^\circ$ e in quella $\theta=180^\circ$ si ha $\alpha=0^\circ$ ed esiste solo una forza di resistenza; per poter generare una spinta di portanza è necessario un angolo di attacco diverso da zero, altrimenti a causa della simmetria tra dorso e ventre della pala non si genera nessuna differenza di pressione e quindi nessuna forza motrice positiva (mentre se il profilo è asimmetrico l'angolo di attacco per il quale si ha portanza nulla varia da profilo a profilo, cosicché anche con un angolo di attacco nullo si potrebbe ottenere generazione di portanza).

Non appena le pale si allontanano dall'angolo appena descritto nasce la portanza, dall'inglese "lift force", cioè una forza perpendicolare alla velocità relativa che possiede una componente in grado di spingere in avanti le pale; naturalmente la forza di resistenza, dall'inglese "drag force", diretta come la velocità relativa rimane e tende a rallentare le pale.

La coppia generata dalle forze di portanza deve essere maggiore della coppia generata da quelle di resistenza per poter essere in grado di produrre energia utile.

Le pale delle Darrieus, al pari di quelle delle turbine ad asse orizzontale, quando raggiungono una velocità eccessiva iniziano a stallare, offrendo un freno aerodinamico per il rotore, evitando i sovraccarichi, inoltre spesso questi aerogeneratori sono dotati di un ulteriore meccanismo mobile che alle alte velocità esce creando un effetto frenante.

1.7 La turbina Savonius a geometria variabile

L'attività di ricerca oggetto del presente dottorato è incentrata sullo sviluppo della turbina Savonius a geometria variabile ideata dal Prof. Antonio Pantano e coperta da Brevetto Internazionale (vedi figura 1.11):



Figura 1.11 - Prototipo di turbina Savonius a geometria variabile

La turbina è costituita da quattro assi porta pale, due disposti nella parte bassa dell'albero e altri due nella parte superiore. Gli assi sono disposti parallelamente tra loro e sfasati a coppie di 90° in modo che si possa ottenere una distribuzione di coppia motrice pressoché costante durante la rotazione della turbina.

Le pale sono collegate mediante bulloni agli assi porta pale e presentano uno sfasamento relativo di 90° . Tale sfasamento fa sì che a un certo istante se una pala è disposta verticalmente e viene investita dal vento, l'altra è disposta orizzontalmente e quindi di taglio rispetto al vento, rendendo possibile la rotazione della turbina. Al contrario, se su uno stesso asse si montassero le pale entrambe in posizione verticale (sfasamento relativo nullo), le forze che il vento esercita sulle pale genererebbero una coppia risultante nulla, rendendo impossibile la rotazione della turbina. Tale sistema, come già visto descrivendo il panemone, se da una parte consente di ovviare all'effetto deportante del profilo non attivo delle pale concave delle classiche turbine Savonius, d'altro canto impone l'utilizzo di pale piane, con un conseguente minor Coefficiente di potenza.

E' evidente che, affinché possano lavorare correttamente, durante la rotazione della turbina le pale non devono assolutamente ruotare intorno all'asse dei cuscinetti, perché altrimenti la spinta del vento invece che

generare coppia intorno all'asse dell'albero fornirebbe coppia intorno all'asse dei cuscinetti.

Di seguito è mostrata una vista dall'alto delle due coppie di assi porta pale, la direzione del vento e le forze F_1 e F_2 che spingono sulle pale disposte verticalmente del gruppo pale 2, mettendo in rotazione la turbina.

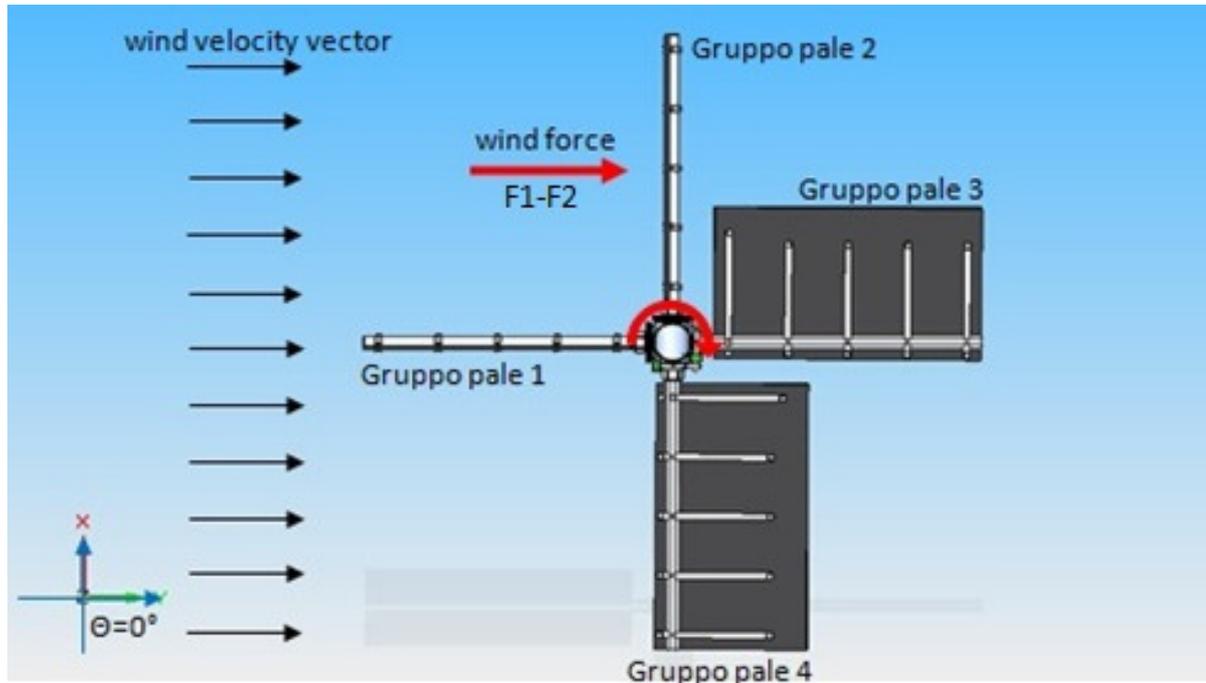


Figura 1.12 - Forze agenti sulle pale

In precedenti lavori di ricerca è stata ottimizzata la progettazione dei componenti cinematici della turbina (alberi, supporti, assi porta pale) ed è stata scelta la soluzione di realizzare i profili delle pale con delle tele di derivazione velistica consentendo un cospicuo risparmio di peso delle masse sospese ed in termini economici.

Come anticipato, obiettivo dell'attività di ricerca oggetto del presente dottorato è identificare una configurazione di turbina mista Savonius-Darrieus con pale variabili che ottimizzi il funzionamento della turbina su una forbice di ventosità ampia ed aderente alle caratteristiche tipiche dei siti italiani. A tal proposito il primo passo consiste nell'analizzare le specificità del progetto e le eventuali criticità.

1.8 La turbina ibrida

Sul mercato sono già disponibili dei prodotti ibridi a geometria fissa, i principali problemi legati a questa soluzione sono generalmente fenomeni di interferenza aerodinamica che compromettono le prestazioni della Darrieus esterna.

Gli studi condotti da Wakui et al. (2005) su turbine ibride confermano che questa configurazione non è la soluzione migliore per ottimizzare le prestazioni. Nella figura seguente si vede come per λ (Tip Speed Ratio) > 4 il coefficiente di potenza della turbina ibrida è minore del singolo contributo fornito dalla Darrieus, infatti ad alti λ la Savonius, oltre a generare interferenza aerodinamica per la Darrieus, produce una potenza negativa che riduce le prestazioni totali.

Configurazioni ibride

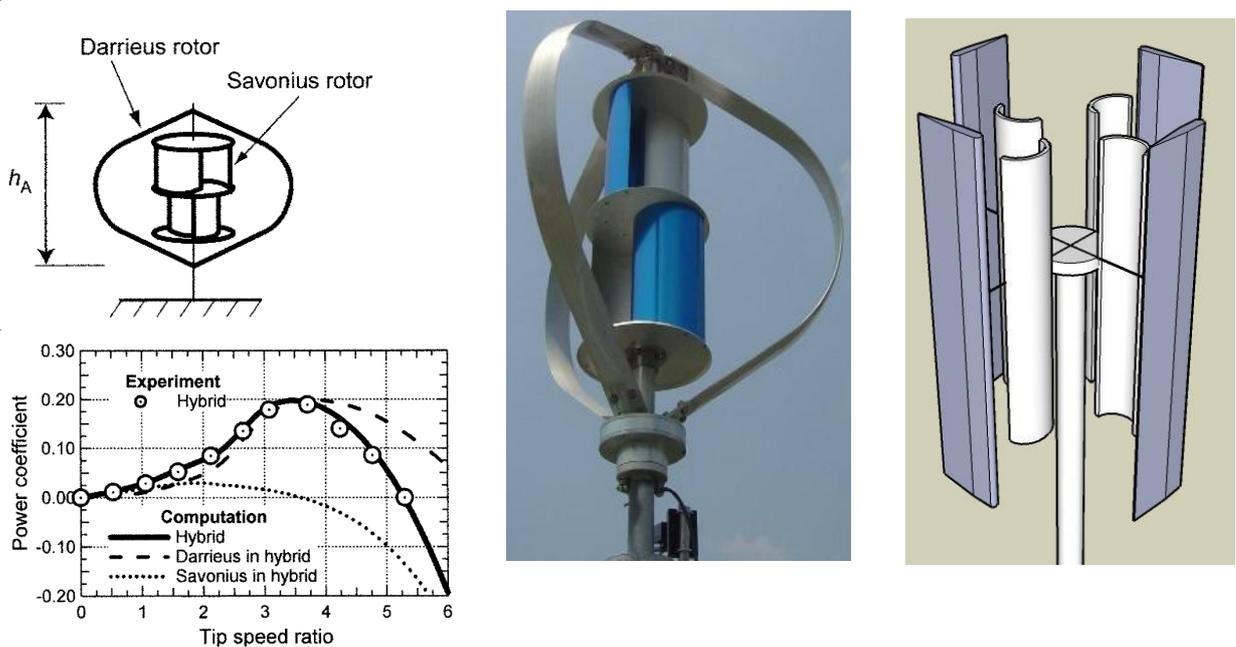


Figura 1.13 - Tipologie di turbine ibride Savonius-Darrieus

CAPITOLO 2

Le analisi preliminari

2.1 Il legame λ - C_p

Dalla letteratura è noto che il coefficiente di Potenza (C_p) della turbina eolica, che misura il rapporto tra la potenza disponibile del vento e quella effettivamente estratta varia in funzione del TSR (definito come il rapporto tra la velocità tangenziale all'estremità delle pale e la velocità del vento in ingresso al tubo di flusso) e, fissata la geometria delle pale, presenta un unico punto di massimo, come si evince dalla figura seguente:

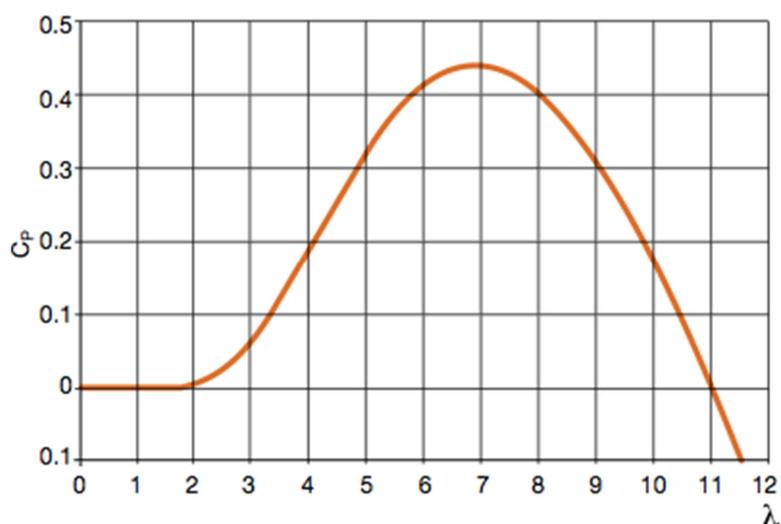


Figura 2.1 - Legame λ - C_p

Per una data pala, il legame λ - C_p dipende dall'angolo di Pitch. Mantenendo costante l'angolo di Pitch, si possono fare le seguenti considerazioni:

- esiste un unico valore di TSR per cui l'efficienza di conversione è massima ($C_p \text{ max}$) dipendentemente dal tipo di pala;
- al variare della velocità del vento occorre variare volutamente la velocità di rotazione delle pale se si vuole mantenere il TSR costante e pari al valore per cui si ha $C_p \text{ max}$;
- per valori bassi di TSR si ha una riduzione della portanza ed un aumento della resistenza fino al raggiungimento dello stallo;

- per valori alti di TSR si ha una riduzione sia della portanza che della resistenza in una condizione detta “di fuga”.

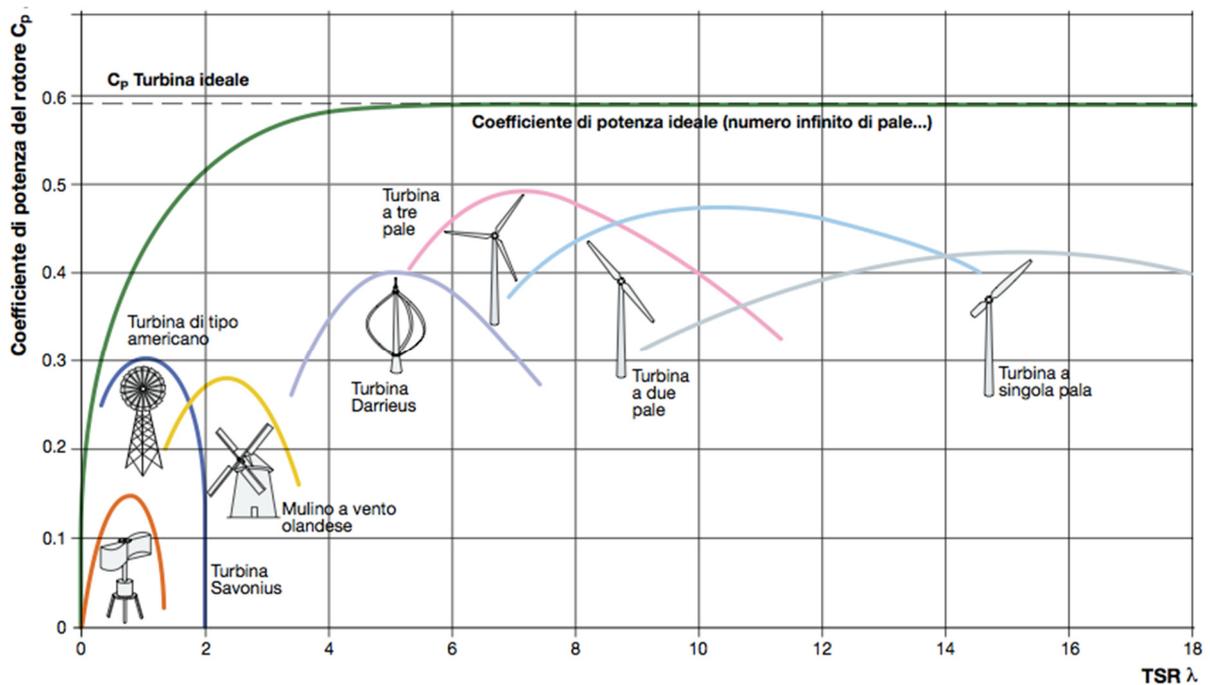


Figura 2.2 – Legame λ - C_p per varie tipologie di turbine

La principale problematica nella progettazione di una turbina ibrida consiste nella discontinuità di funzionamento delle turbine: nella figura seguente vengono confrontati i punti rilevati sperimentalmente su due turbine (Savonius-Darrieus) con la seguente geometria:

Tipologia di turbina	TSR Ottimale	Velocità tangenziale [m/s]	Raggio rotore [m]
<i>Savonius</i>	1,258	7	1
<i>Darrieus</i>	4,514	35	1,5

Tabella 2.1 – Caratteristiche geometriche turbine Savonius-Darrieus

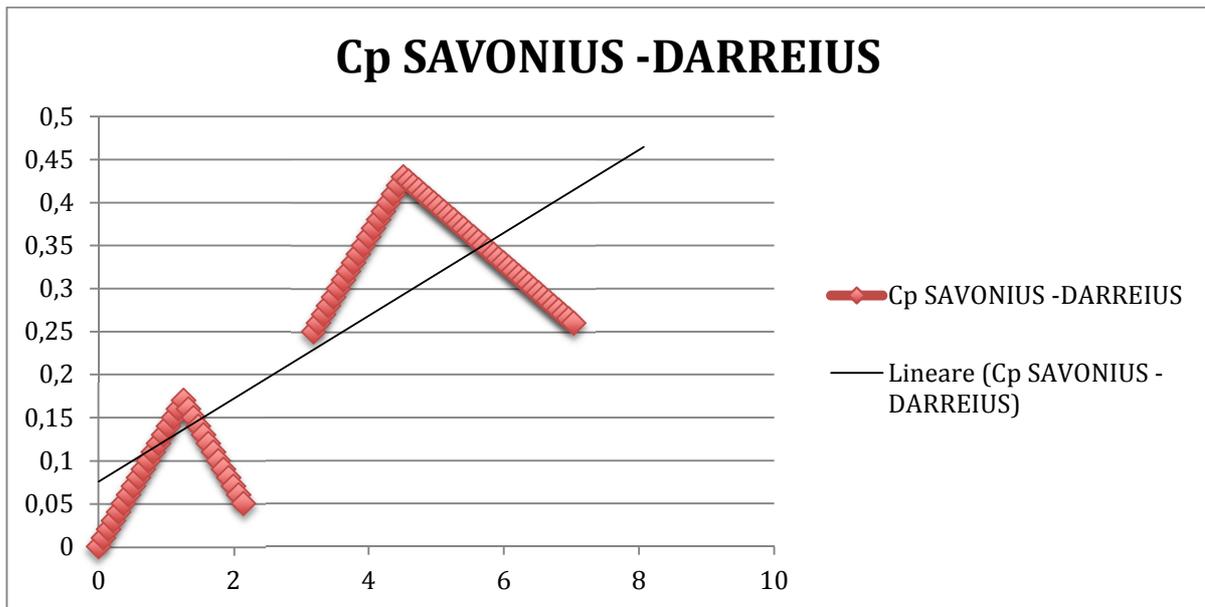


Figura 2.3 - Legame sperimentale λ - C_p per le geometrie assegnate

La turbina Savonius garantisce un coefficiente di potenza discreto per TSR pari a 1,258. La geometria variabile consente di mantenere i parametri di funzionamento della turbina intorno a tali valori ma la potenza teoricamente estraibile dal filetto fluido (tenendo conto del limite di Betz) è al più pari a $0,17 \cdot 0,59 = 0,1003$ della potenza totale disponibile (al lordo delle perdite legate ai rendimenti dei vari componenti meccanici). Di contro una turbina Darrieus presenta un TSR ottimale pari a 4,514. E' evidente che la soluzione ideale consiste nello sfruttare la turbina Savonius esclusivamente come avviamento per la Darrieus. Occorre gestire al meglio il transitorio e trovare una configurazione per la messa a bandiera della Savonius in condizioni di regime.

Come detto, la maggiore limitazione che impedisce la comune diffusione delle turbine Darrieus è l'incapacità di raggiungere una velocità sufficiente tale per cui si possa sviluppare una portanza che autoalimenti il moto di rotazione della turbina. Infatti solo per considerevoli velocità del vento la turbina potrebbe avviarsi, ma a volte neppure un vento forte sarebbe in grado di vincere le resistenze dovute alle vorticosità che si generano sul profilo e si propagano anche sui profili seguenti. Innanzi tutto definiamo con più precisione il termine "auto-avviamento". Ebert e Wood sostengono che l'avviamento termina quando la turbina è in grado di iniziare ad estrarre potenza, mentre Kirk sostiene che una turbina può definirsi in grado di auto-avviarsi solo se essa è in grado di accelerare dal momento in cui produce un "output significativo". In entrambi i casi però le due definizioni sono semplicemente qualitative. Altri, per esempio Lunt, hanno adottato una definizione più specifica in base alla quale si ritiene che la macchina si sia

avviata correttamente quando le pale operano ad una velocità costante che supera quella della vena fluida indisturbata; cioè per definizione il $TSR > 1$ (Tip Speed Ratio, rapporto fra la velocità periferica della macchina e la velocità del vento). Il fondamento di questa definizione quantitativa risiede nel fatto che la turbina, lavorando solo per resistenza, non può raggiungere la velocità del vento, quindi durante la rotazione deve essere prodotta necessariamente una forza portante. Sebbene sia una definizione più precisa delle precedenti, anch'essa ha delle limitazioni; in particolare è evidente che nel momento in cui inizia a generarsi portanza, lungo una parte significativa della rivoluzione non è comunque garantito che la macchina continui ad accelerare. Baker suppone che per un $TSR < 2$ c'è una coppia insufficiente o addirittura negativa che ostacola un'ulteriore accelerazione. Quando si opera in tale zona, solo un'improvvisa raffica di vento può portare il rotore della macchina ad un completo funzionamento a portanza. Questa affermazione implica che sono necessarie precise condizioni atmosferiche affinché il processo di avviamento per una turbina Darrieus a profili simmetrici con geometria fissa avvenga compiutamente.

2.2 Le evoluzioni del progetto

In prospettiva è possibile ipotizzare un sistema ibrido con pale mobili sia per la turbina Savonius (con funzionalità essenzialmente legate all'avviamento ed al funzionamento in condizioni di bassa ventosità, condizione che dalle considerazioni precedenti appare inevitabile) che per la Darrieus. In una prima fase tuttavia è possibile ipotizzare una configurazione intermedia che serva a validare la bontà dell'idea.

Da queste considerazioni nasce l'idea di creare una VAWT con un semplice meccanismo di variazione di geometria che permetta di sfruttare al massimo le potenzialità dei due diversi tipi di configurazioni.

Un esempio presente in letteratura propone la realizzazione di una turbina Darrieus con all'interno una Savonius a scomparsa in modo da evitare i fastidiosi fenomeni di interferenza aerodinamica e evitare che ad un alto numero di giri la Savonius sottragga potenza alla turbina. Poiché la funzione principale della Savonius sarebbe quella di avviare tutta la turbina o di permettere il funzionamento a basse velocità in condizione di vento debole, si è pensato di realizzarla in materiale facilmente ripiegabile (tessuto tipo tenda o vela) e una volta raggiunta la minima velocità che permette alla Darrieus di mantenersi in rotazione, la Savonius si avvolgerebbe intorno ad una sua estremità. Quindi il braccio del telaio che sostiene la pala della Darrieus non è perpendicolare alla pala come nelle convenzionali configurazioni Darrieus a geometria fissa, ma è semicircolare, in quanto è

anche la guida che permette alla vela di mantenere la forma della Savonius.

Prima di procedere alla progettazione strutturale della turbina è necessario valutare i potenziali fattori di interferenza aerodinamica e soprattutto ottimizzare la cinematica del sistema ibrido. E' stata pertanto condotta una analisi preliminare di natura multibody con un software dedicato per ridurre al minimo i test sperimentali. Per ottenere un set di informazioni affidabili ed interpretabili è necessario svolgere due tipologie di analisi:

1 - Geometria delle turbine rigida (bloccando tutti i gradi di libertà degli elementi rotanti tranne la rotazione attorno all'asse verticale), in maniera tale da poter:

- valutare se esiste un rapporto tra diametro della Savonius e diametro della Darrieus che ottimizza le prestazioni;
- trovare il miglior rapporto tra altezza e diametro (H/D) e tra corda del profilo e diametro della turbina (c/D), e valutare se cambiando tipo di profilo, con diverso spessore e curvatura le prestazioni migliorano;
- valutare se esiste un migliore posizionamento relativo delle pale. In questo studio le pale sono equispaziate ($\Delta\theta = 90^\circ$).

2 - Geometria delle turbine mobile (sbloccando le rotazioni intorno agli assi) per valutare l'impatto dei carichi periodici derivanti dalla coppia (accelerazione, velocità, potenza); la frequenza è legata alla velocità di rotazione e il valore istantaneo alla posizione angolare della pala. Queste oscillazioni inducono fatica sulle strutture ed occorre ridurle al minimo, una strada potrebbe essere quella di sfasare ogni sezione di un certo $\Delta\theta$, in modo che sommando grandezze con stessa frequenza ma diversa fase si ottiene un valore costante e indipendente dalla fase.

2.3 Analisi multibody

Le analisi multibody iniziali sono state svolte su un modello semplificato utilizzando il software Adams che consente definire gli elementi strutturali (bodies) assegnando ad essi dimensioni e massa. Questi elementi sono collegati tra di loro attraverso vincoli (connections) di diversa natura (rotazioni nella fattispecie). Ai bodies è possibile assegnare movimenti (motions) ed è possibile applicare ad essi forze esterne compresa la forza di gravità. Dalla combinazione tra i movimenti assegnati (è possibile definire tipologia, velocità ed accelerazioni relative ad ogni movimento) e la massa degli elementi vengono calcolate le forze di inerzia cui sono soggetti.

Di seguito alcune immagini del modello iniziale di turbina Savonius a geometria variabile brevettata dal Prof. Pantano:

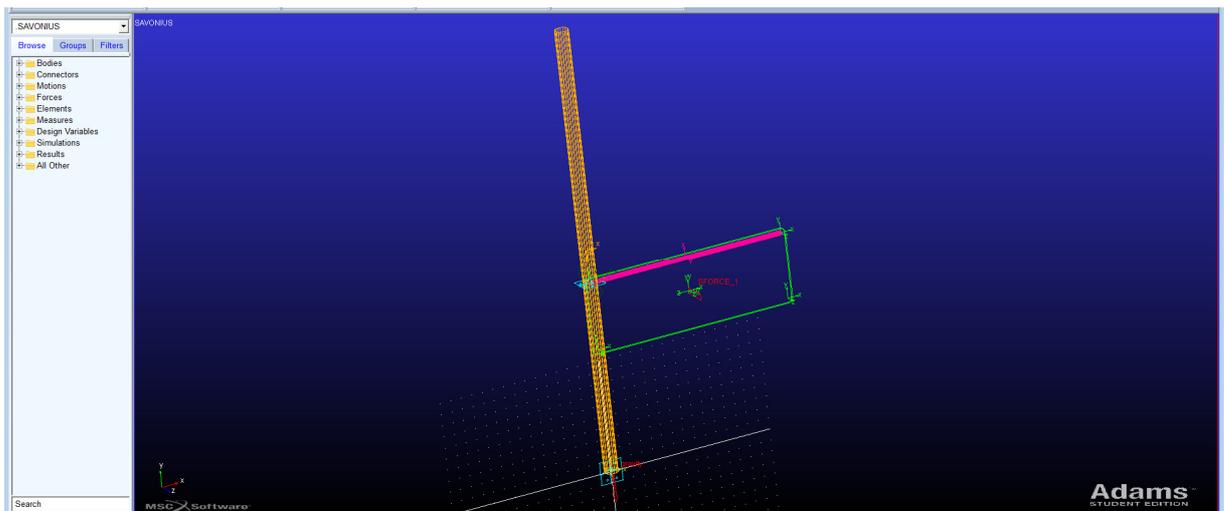


Figura 2.4 - Modello Adams di una pala della turbina Savonius a geometria var.

Il modello semplificato prevede una sola pala rotante. Al movimento intorno al proprio asse (x in figura) si somma il movimento di tutto il sistema intorno all'asse verticale (y). Le forze applicate sono evidenziate nella figura seguente:

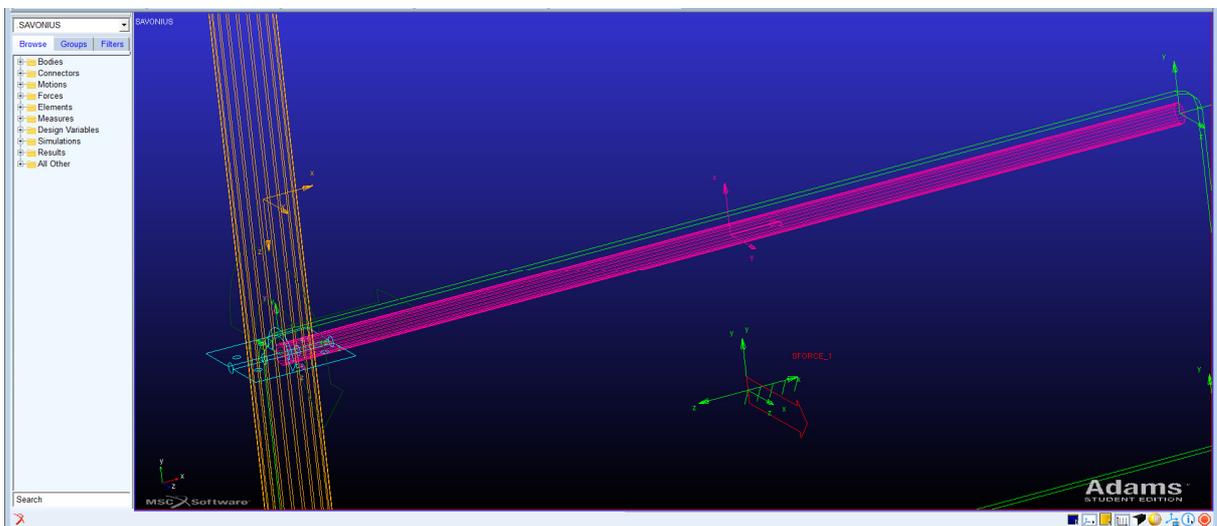


Figura 2.5 - Forze applicate sulla pala della turbina

La pala è vincolata all'asse secondo lo schema seguente:

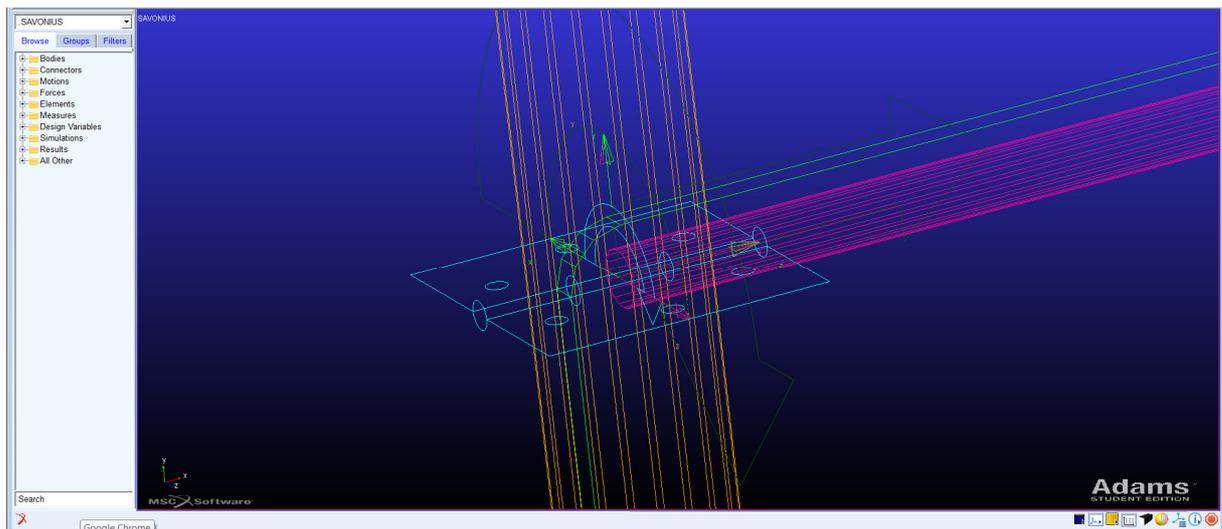


Figura 2.6 - Schema di vincolo del supporto della pala

2.4 Progettazione preliminare della turbina ibrida Savonius-Darrieus

Si è individuato un sistema che, con le sue caratteristiche geometriche e di funzionamento, soddisfacesse l'idea concettuale della nuova turbina e potesse costituire base di riferimento per la progettazione di questa. Tali caratteristiche sono state individuate nella ROPATEX MAXI VERTICAL 6 kW che presenta una larghezza del rotore di 4,7 metri e un'altezza delle pale di 2,5 metri, grandezze, queste, che sono state individuate come plausibili per la progettazione della turbina oggetto del seguente lavoro di tesi. Immagini renderizzate della turbina progettata sono mostrate nelle pagine seguenti.

I profili aerodinamici sono stati studiati per un'elevata efficienza e in una gamma di prestazioni e caratteristiche molto diverse, tali da offrire un'ampia scelta per ogni applicazione. I profili comunemente adoperati per la realizzazione delle pale di una turbina eolica sono spesso individuati sia fra quelli della serie NACA, sia NREL oppure FFA. In taluni casi, per specifiche applicazioni, i profili vengono appositamente disegnati. Inoltre, nella fase progettuale, è di fondamentale importanza conciliare la scelta fra le caratteristiche di resistenza delle pale con il loro peso, soprattutto per applicazioni di grandi dimensioni, nonostante tali elementi si presentano cavi. Il peso, infatti, incide sugli sforzi interni alle pale e su quelli trasmessi al sistema meccanico (albero, cuscinetti e rotore) e può avere conseguenze sulla torre e sulle fondamenta. Durante la rotazione le sollecitazioni variano ciclicamente, sollecitando a fatica il sistema eolico. A ciò si aggiungono, anche, le sollecitazioni prodotte dalla forza centrifuga e dalle azioni aerodinamiche. Queste ultime sono anch'esse periodiche, in quanto le pale ruotano nello strato limite terrestre e quindi incontrano flussi di vento a velocità diverse. Altre sollecitazioni a fatica sono causate dalla turbolenza del

vento, che per la sua velocità, subisce variazioni su breve scala temporale esercitando sollecitazioni variabili. L'intensità della turbolenza comporta, altresì, una sensibile fluttuazione delle azioni aerodinamiche. In definitiva, le pale devono essere resistenti ma anche leggere e flessibili, ecco perchè si adottano materiali leggeri, quali i materiali plastici rinforzati in fibra, con buone proprietà di resistenza all'usura. Il profilo utilizzato per la progettazione preliminare dell'aerogeneratore ad asse verticale è il NACA 0012.

Come accennato in precedenza, la pala prevede l'utilizzo di un flap mobile posizionato sul bordo d'uscita del profilo. L'utilizzo di tale elemento, azionato da un meccanismo interno comandato dal movimento rotatorio degli assi portapala, ha un duplice vantaggio: permette di incrementare le prestazioni e l'efficienza della turbina, sia nella fase di avviamento che di stallo dinamico. Il suo centro di rotazione è posizionato a $1/4$ di lunghezza di corda dal bordo di uscita e il range dell'angolo di rotazione è da -30 a $+30$ gradi. Il flap è fissato sul profilo aerodinamico mediante un asse incernierato che ne consente la rotazione.

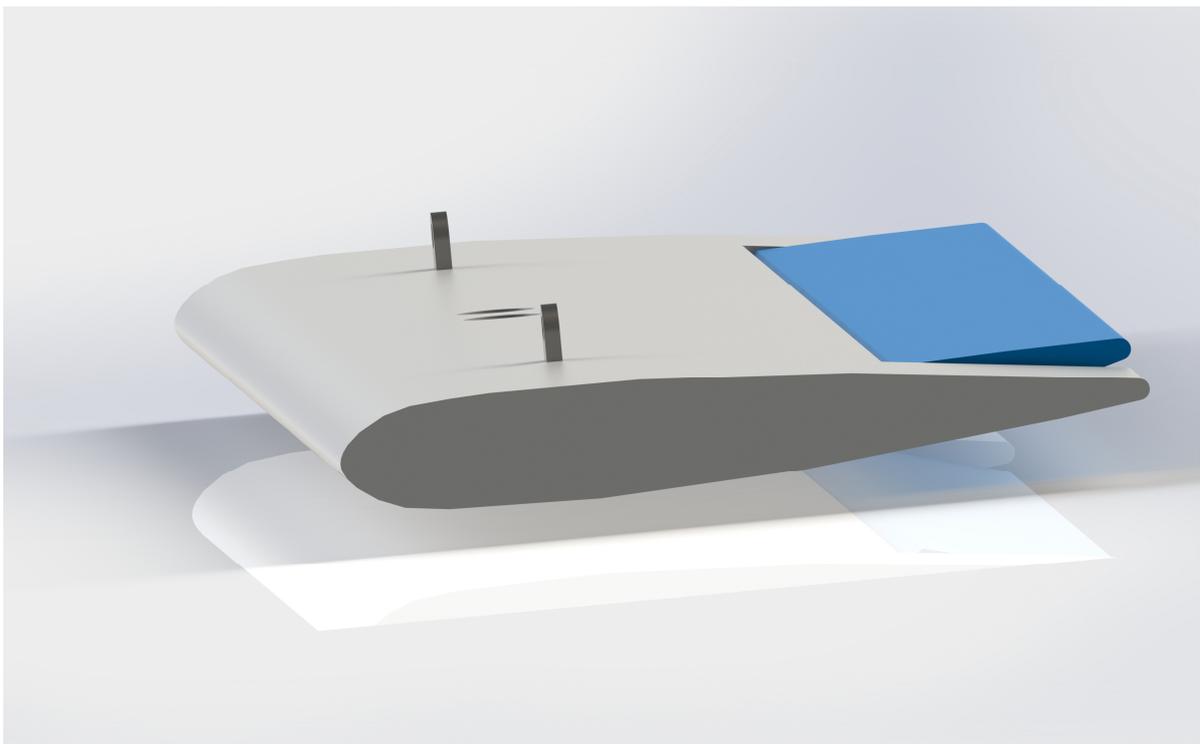


Figura 2.7- modello CAD del Flap mobile



Figura 2.8 - Assemblato CAD della turbina

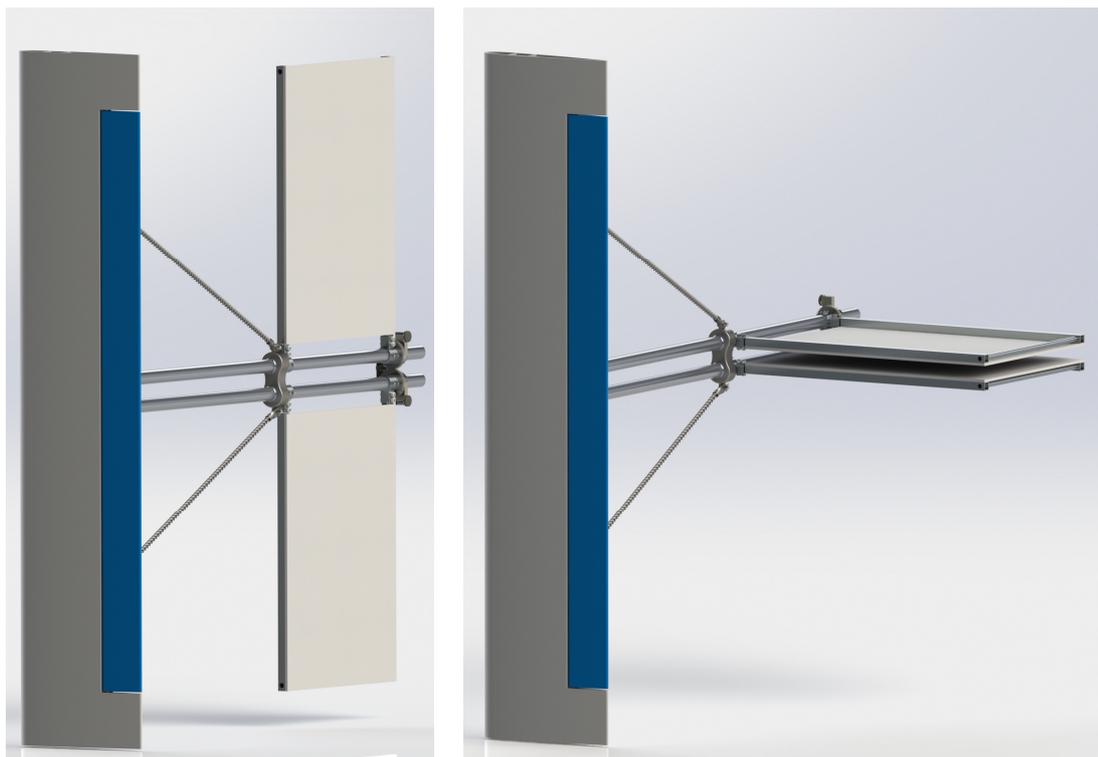


Figura 2.9 - Modello CAD delle palette oscillanti in posizioni di apertura e chiusura

CAPITOLO 3

Il progetto preliminare

3.1 Le specifiche del progetto

La definizione delle caratteristiche cinematiche e meccaniche della turbina si è rivelata estremamente complessa per via delle molteplici variabili in gioco. Al fine di definire la linea di sviluppo progettuale si è deciso di focalizzare gli studi sulle seguenti quattro macro aree:

- Riduzione delle masse in movimento;
- Definizione del sistema di comando della geometria del profilo delle pale;
- Definizione del profilo delle pale ottimizzato;
- Semplificazione della catena cinematica necessaria al movimento comandato delle pale.

Una volta definite queste quattro specifiche è stato possibile sviluppare il progetto meccanico esecutivo e costruire un prototipo che dimostri l'efficacia della soluzione proposta.

Nei paragrafi successivi vengono analizzati le evoluzioni e le scelte progettuali per ciascun punto.

3.2 La riduzione delle masse in movimento

Per ridurre le masse sospese in movimento e le conseguenti inerzie sono essenzialmente possibili due strade: l'utilizzo di materiali a basso peso specifico (es. fibre artificiali o vegetali) e la messa a punto di un sistema meccanico che permetta di svincolare l'albero della turbina Savonius dopo aver avviato la rotazione della Darrieus a basse velocità, in modo tale da ridurre le masse trascinate in rotazione da quest'ultima.

3.2.1 Ipotesi preliminare: meccanismo di sgancio tramite connettore assiale

Lo studio è stato effettuato per ottenere una turbina eolica che operi in un range più ampio di valori dell'intensità del vento, con prestazioni migliori: la

turbina in questione è costituita da un modello Darrieus e da uno Savonius (figura 3.1).

Come già noto, il primo non è in grado di autoavviarsi e per questo generalmente lo si trova accoppiato con uno Savonius che, sfruttando la resistenza opposta al vento, sviluppa una coppia sufficiente ad avviarlo.

Oltre poi al problema dell'avviamento, c'è anche quello delle differenti condizioni ottimali di ventosità per le due turbine: la turbina Savonius si presta bene per bassi valori di velocità del vento, mentre quella Darrieus per valori più alti.

La prima soluzione elaborata è stata concepita per consentire le tre seguenti situazioni, a patto che le due turbine vengano montate per ruotare nello stesso verso:

- trasmissione di potenza dalla turbina Savonius all'albero lento quando il vento è insufficiente a sostenere la Darrieus;
- avviamento della turbina Darrieus mediante trasmissione di potenza della Savonius quando il vento è sufficientemente teso da rendere utilizzabile anche la prima.
- trasmissione di potenza dalla sola turbina Darrieus all'albero veloce quando la velocità del vento assume valori troppo elevati per ottenere un valore ottimale di C_p della Savonius.

Le tre combinazioni di accoppiamento sono rese possibili da un elemento chiamato "CONNETTORE", che può scorrere assialmente, azionato dalla forza del vento esercitata su un pannello mobile cui esso è collegato.

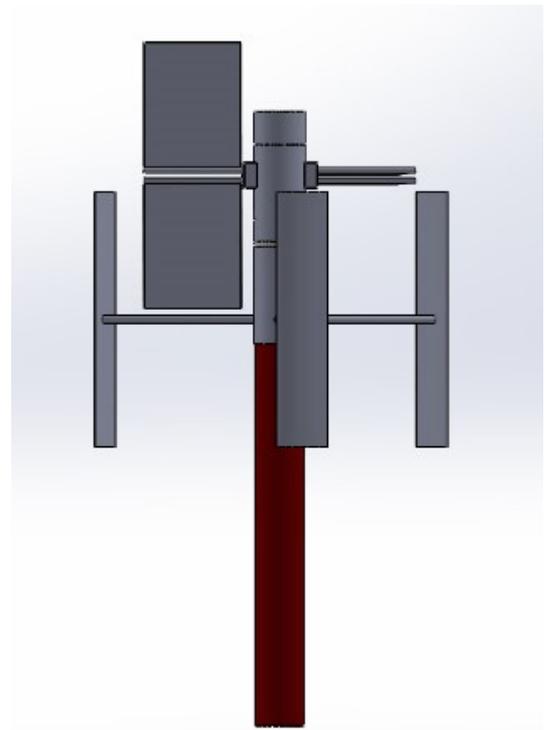
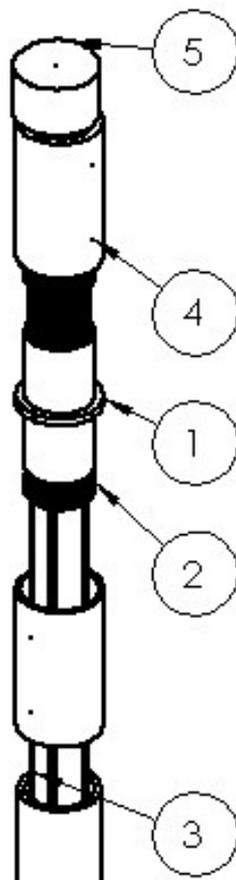


Figura 3.1 - Modello CAD del sistema complessivo

Il sistema consiste di:

- Albero di trasmissione
- Connettore mobile
- Mozzo
- Albero turbina Savonius
- Albero turbina Darrieus
- Base mobile per banderuola

In figura 3.2 è fornita una vista esplosa del sistema. Ne sono state escluse dalla rappresentazione le pale ed altri elementi non caratteristici del meccanismo.



Num. articolo	Num. parte
1	Mozzo
2	Connettore
3	Albero di trasmissione
4	Albero turbina
5	Base banderuola
6	Palo portante
7	Base pale mobili Savonius
8	Pala mobile Savonius
9	Parte estrema del connettore
10	Pala Darrieus Profilo naca4412

Figura 3.2- Vista esplosa del meccanismo

- **Albero di trasmissione**

L'albero di trasmissione può essere lo stesso albero lento o un elemento di trasmissione che riceve il moto dal connettore tramite accoppiamento scanalato e lo rimanda al sistema di ingranaggi collegato all'albero veloce del generatore. E' posizionato all'interno del connettore.

- **Connettore mobile**

E' un elemento cilindrico cavo, scanalato sia internamente che esternamente (figura 3.3). La scanalatura interna deve consentire l'accoppiamento con l'albero di trasmissione e deve essere tale da facilitare lo scorrimento assiale lungo l'albero di trasmissione. La superficie esterna presenta tre fasce di scanalatura separate tra loro, due estreme, una centrale: i denti delle prime due hanno un'altezza maggiore di quelli situati nella parte centrale e il loro profilo deve esser ottimizzato per favorire l'innesto con gli alberi delle due turbine.

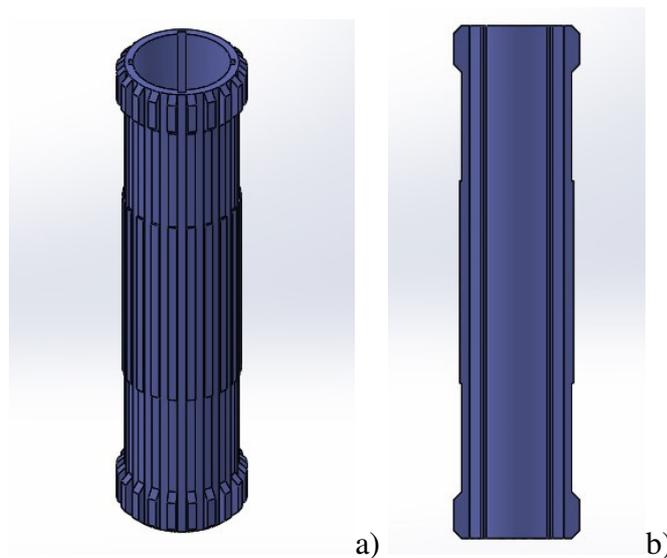


Figura 3.3 - Connettore mobile. B) Vista in sezione

- **Mozzo**

Il mozzo è scanalato internamente (figura 3.4) per consentire l'accoppiamento col connettore. Il diametro esterno varia in modo netto nella parte centrale. La sua funzione è quella di costituire un supporto su cui far ruotare gli alberi delle turbine indipendentemente

tra loro, separandoli anche dal connettore. Non può scorrere assialmente. La sua lunghezza è minore di quella del connettore.

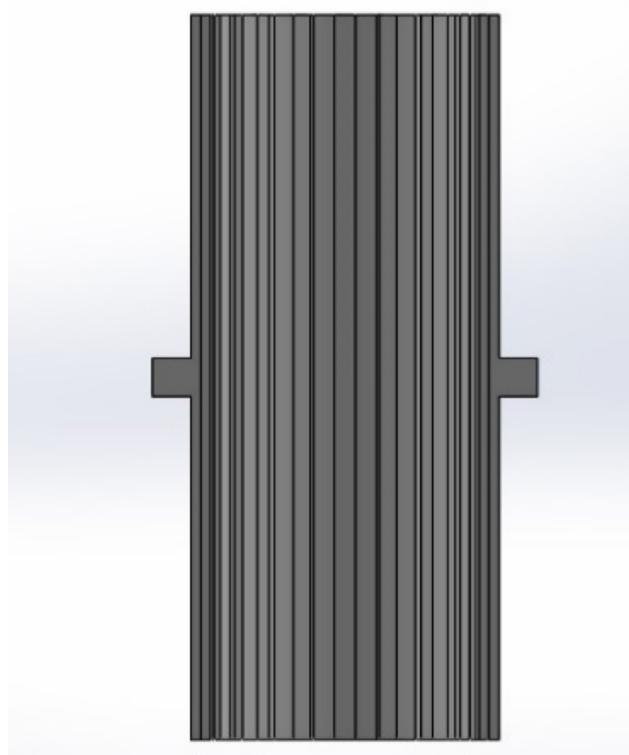


Figura 3.4 - Sezione mozzo

- **Albero turbina**

L'albero della turbina (figura 3.5) ruota solidalmente con le pale. Può eventualmente avere le stesse caratteristiche geometriche per entrambi i modelli delle turbine. La cavità interna è divisa in due parti: una scanalata, l'altra liscia. Quest'ultima ospiterà il mozzo. Le scanalature invece partono dal centro e si estendono verso l'estremità per due terzi di questa lunghezza. In questa sezione dell'albero, il connettore può scorrere assialmente. Gli alberi devono essere montati specularmente tra loro.

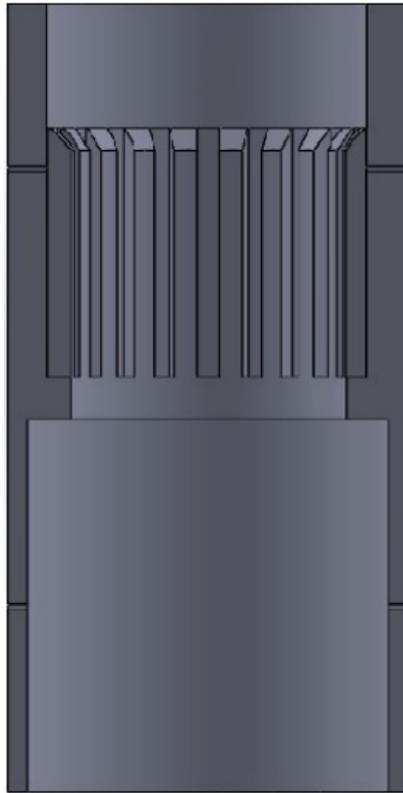


Figura 3.5 - Sezione Albero turbina

- **Base mobile per banderuola**

E' costituita da un cilindro cavo (figura 3.6) capace di ruotare indipendentemente dal resto del sistema. Su di essa deve esser montato il sistema di comando del connettore, il cui elemento principale è il pannello che dovrà trovarsi sempre ortogonalmente alla direzione del vento. L'orientamento avviene in maniera meccanica.



Figura 3.6 - Sezione Base mobile per banderuola

Funzionamento

In condizioni di scarsa ventosità, la forza del vento è insufficiente per muovere il pannello su cui agisce (che verrà meglio descritto nel paragrafo successivo), di conseguenza il connettore è completamente abbassato. In questa configurazione, i denti della parte superiore del connettore sono in presa con quelli interni all'albero della turbina Savonius, mentre i denti dell'estremità inferiore ruotano liberamente. Il solo collegamento possibile è quello tra la Savonius e l'albero di trasmissione (figura 3.7)

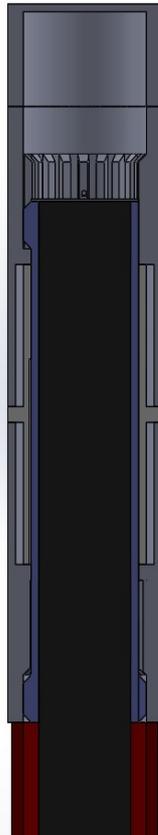


Figura 3.7 - Configurazione con vento scarso

Quando la velocità del vento supera un determinato valore, il pannello cambia posizione e con esso anche il connettore, che scorre assialmente verso l'alto. I denti della parte superiore del connettore restano in presa con la turbina Savonius, mentre quelli della parte inferiore, dopo aver superato l'attrito con i denti dell'albero della Darrieus iniziano a entrare in presa con questi ultimi. Le due turbine ora iniziano a ruotare con la stessa velocità angolare e con esse anche l'albero di trasmissione (figura 3.8).

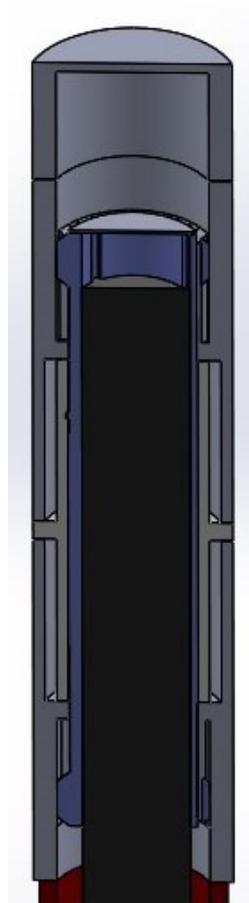


Figura 3.8 - configurazione intermedia

Infine, quando il vento è tale da render troppo basso il parametro TSR della turbina a resistenza incidendo negativamente sul suo C_p , la forza esercitata sul pannello produce uno spostamento di questo tale da trascinare il connettore ulteriormente, sempre verso l'alto, fino a portare i denti della sua parte superiore fuori dal contatto con quelli della turbina Savonius, mentre restano in presa i denti dell'estremità inferiore con quelli della turbina a portanza, che rimane così l'unica a trasmettere potenza (figura 3.9)

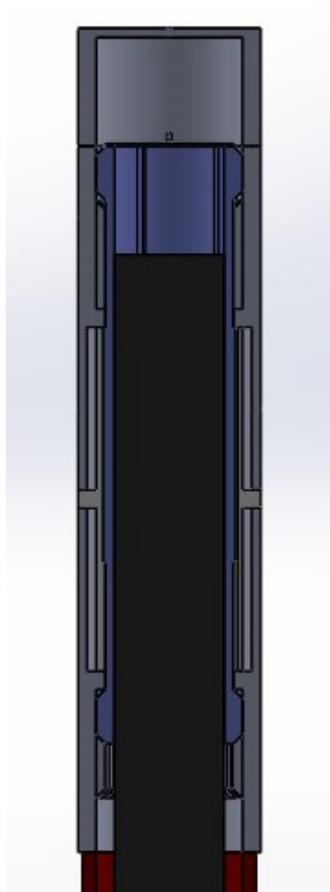


Figura 3.9 - Configurazione con vento teso

In figura 3.10 è possibile vedere la sezione della struttura complessiva (in condizioni di vento teso).

Vantaggi

La soluzione proposta è di tipo meccanico, non richiede quindi l'uso di sistemi elettronici. Non comporta alterazioni sostanziali della struttura globale ed il suo studio risulta svincolato da quello fluidodinamico delle pale. In prima battuta si può dire sia piuttosto semplice anche da un punto di vista costruttivo.

Criticità

Trattandosi di un sistema completamente nuovo, ben poco si può dire a priori circa gli effetti degli attriti e degli urti tra i denti durante le fasi di ingranamento, analogamente riguardo le forze in gioco, in particolare se queste sono tali o no da richiedere materiali e geometrie degli elementi compatibili col funzionamento dell'intera turbina. Di sicuro tale sistema presenta i classici problemi di ingranamento tra denti in movimento non sincronizzati (urti, rumorosità, transitorio di innesto) ragion per cui è

apparso opportuno valutare soluzioni alternative che possano eliminare tali criticità. Ulteriori studi andranno approfonditi anche riguardo il rapporto tra la lunghezza (intesa come dimensione assiale) dei denti interni agli alberi delle turbine e quelli delle estremità del connettore. Da questo rapporto dipende il tempo con cui avviene il passaggio da un tipo di trasmissione all'altra, che è funzione a sua volta del range di valori di ventosità in cui operano i due modelli di turbina.

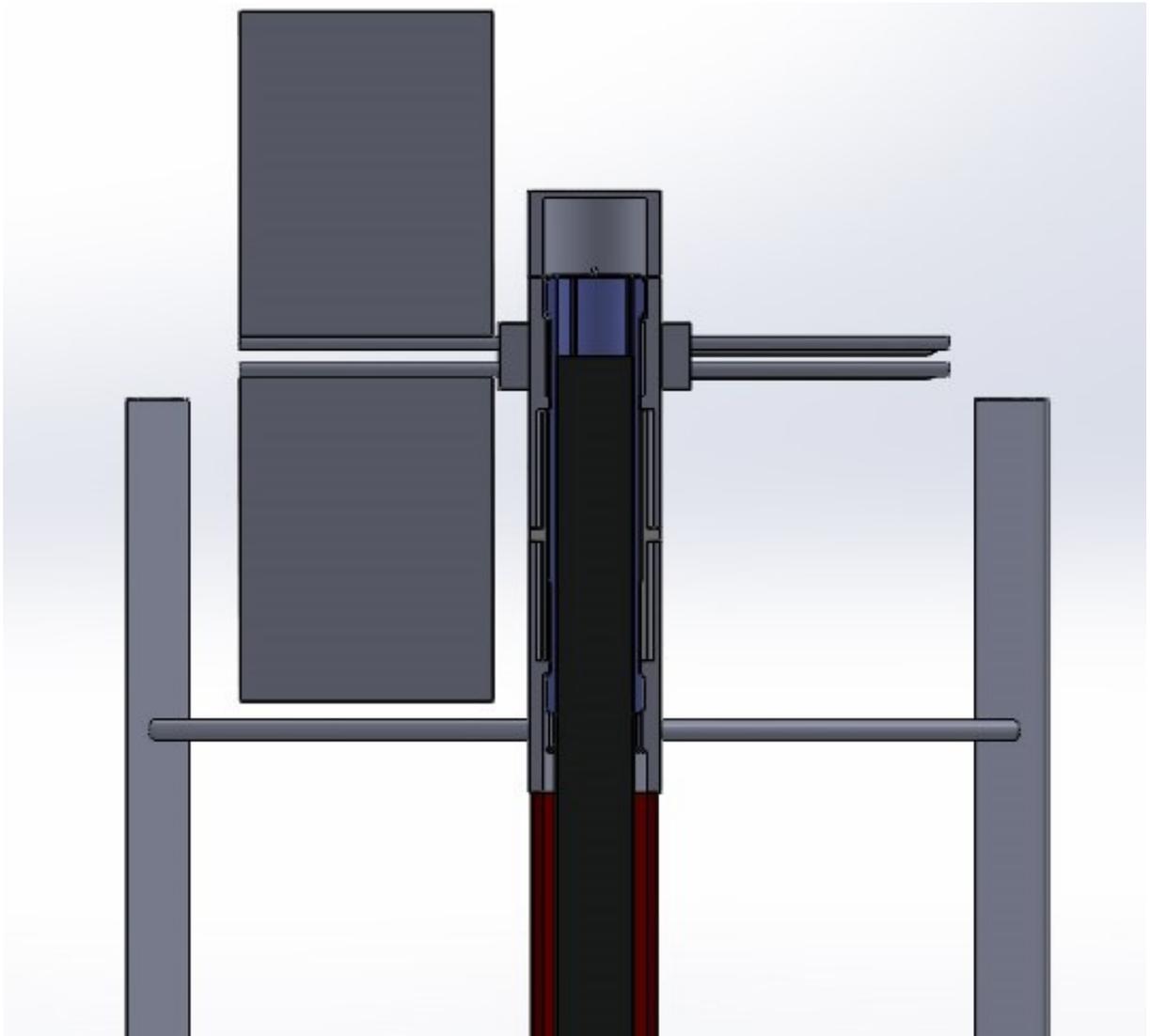


Figura 3.10 - Sezione della struttura complessiva

3.2.2 Soluzione definitiva: meccanismo di sgancio tramite sistema a denti mobili

Pur mantenendo la struttura del precedente sistema, è stata studiata una configurazione differente per il sistema di innesto/disinnesto degli alberi delle turbine. Un mozzo analogo a quello presente nelle ruote posteriori delle biciclette fa sì che il moto venga trasmesso dalla Savonius alla Darrieus, avviandola. Una volta avviata, questa è in grado di accelerare fino a superare in velocità la Savonius. A questo punto, grazie ai denti mobili del mozzo la turbina a portanza può ruotare liberamente, scollegata dall'altra.

La stessa situazione si verifica quando si è in sella ad una bici su un piano con una lieve pendenza in discesa: all'inizio potrebbe esser necessario qualche giro di pedale per vincere l'inerzia al moto (compito svolto dalla turbina a resistenza), ma poi una volta avviata, la ruota prende velocità (proprio come fa la Darrieus) e a quel punto è possibile anche tenere fermi i pedali o ruotarli a velocità inferiore a quella necessaria per accelerare la ruota posteriore, l'effetto sul moto è nullo, la ruota continua a girare praticamente indisturbata.

In tal caso la trasmissione dalla turbina a resistenza a quella a portanza è affidata a un corpo cilindrico sulla cui superficie laterale sono presenti dei denti mobili (figura 3.11). Ogni dente è accoppiato con un elemento elastico (visibile in nero in figura 3.11 e nell'ingrandimento) che lo mantiene in posizione normalmente aperta. In condizioni di avviamento, il dente della Savonius entra in contatto con la faccia interna del dente mobile del mozzo.

La faccia esterna del dente mobile si trova già a contatto col resto del corpo del mozzo e quindi il moto viene trasmesso dalla Savonius al mozzo e da questo alla Darrieus. Una volta avviata, questa acquisisce velocità fino a superare quella della Savonius. A questo punto è la faccia esterna del dente mobile a colpire il dente del rotore Savonius. In questa situazione la forza di contatto sul dente mobile viene trasmessa in verso contrario rispetto alla fase di avviamento e non trovando ostacoli se non l'elemento elastico, il dente è libero di ruotare e portarsi in condizione di chiusura. Ora i due rotori sono scollegati e possono ruotare a velocità differenti senza che l'uno interferisca con l'altro.

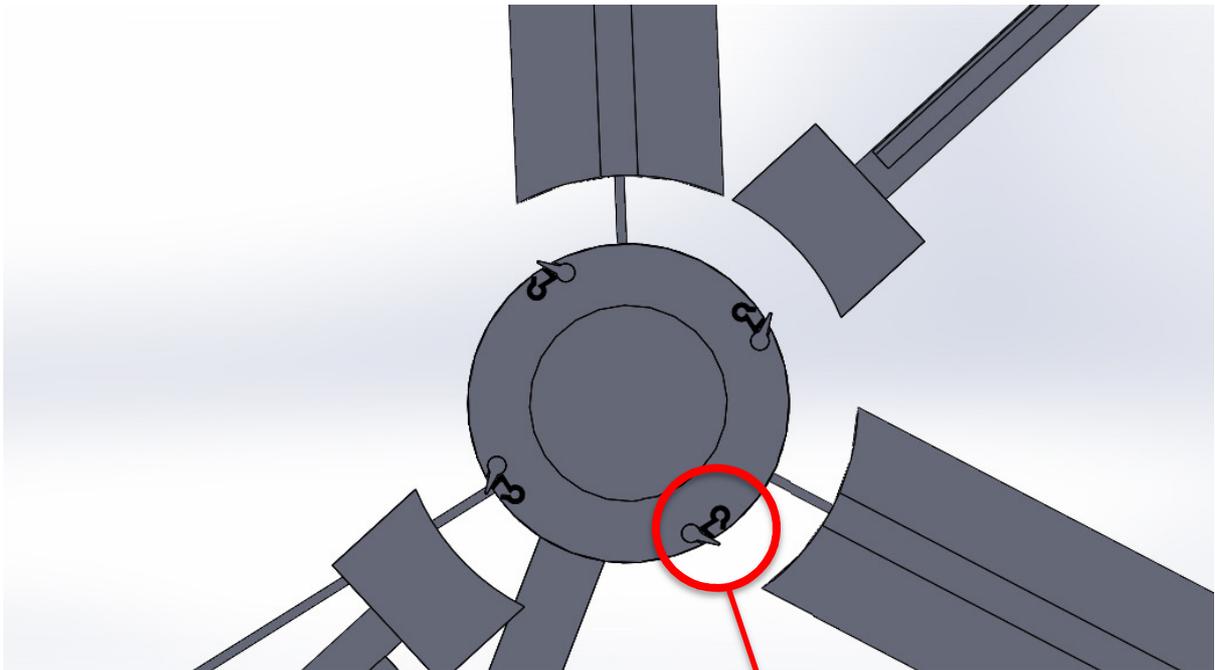


Figura 3.11 - Sezione trasversale del mozzo. Il rotore della Savonius è stato reso invisibile



3.3 Definizione del sistema di comando della geometria del profilo delle pale

Il sistema di comando della geometria delle pale rappresenta un punto essenziale per il funzionamento della turbina. La scelta effettuata a monte è stata quella di rinunciare a qualsiasi sistema di controllo elettronico in modo tale da ridurre complessità, costo e da non pregiudicare l'affidabilità del sistema. Si è deciso pertanto di utilizzare un sistema puramente meccanico azionato dalla stessa forza del vento. In prima istanza può esser concepito come costituito da un pannello ortogonale al piano orizzontale, montato sulla

base mobile della banderuola, in grado di traslare nel piano orizzontale su opportune guide sotto l'azione del vento.

3.3.1 Ipotesi preliminare: sistema con connettore

Nell'ipotesi di utilizzare il sistema con connettore, il collegamento tra questo ed il pannello può essere effettuato mediante un cavo dotato di un sistema che ne impedisca l'attorcigliamento con la rotazione del connettore.

Sotto queste ipotesi costruttive è stata effettuata una prima simulazione fluidodinamica tramite l'uso del software Solid Works (figure 3.12 e 3.13), che, pur non essendo un programma dedicato a questo genere di analisi, si presta comunque molto bene, per avere un'idea indicativa delle dimensioni del pannello, supposto di forma quadrata piana, di lato 1000mm, montato sul bordo della base della banderuola. E' risultato che per poter avere una forza di quasi 20 N con un vento che incida frontalmente sul pannello a una velocità di 5 m/s, la superficie deve essere di circa 1m².

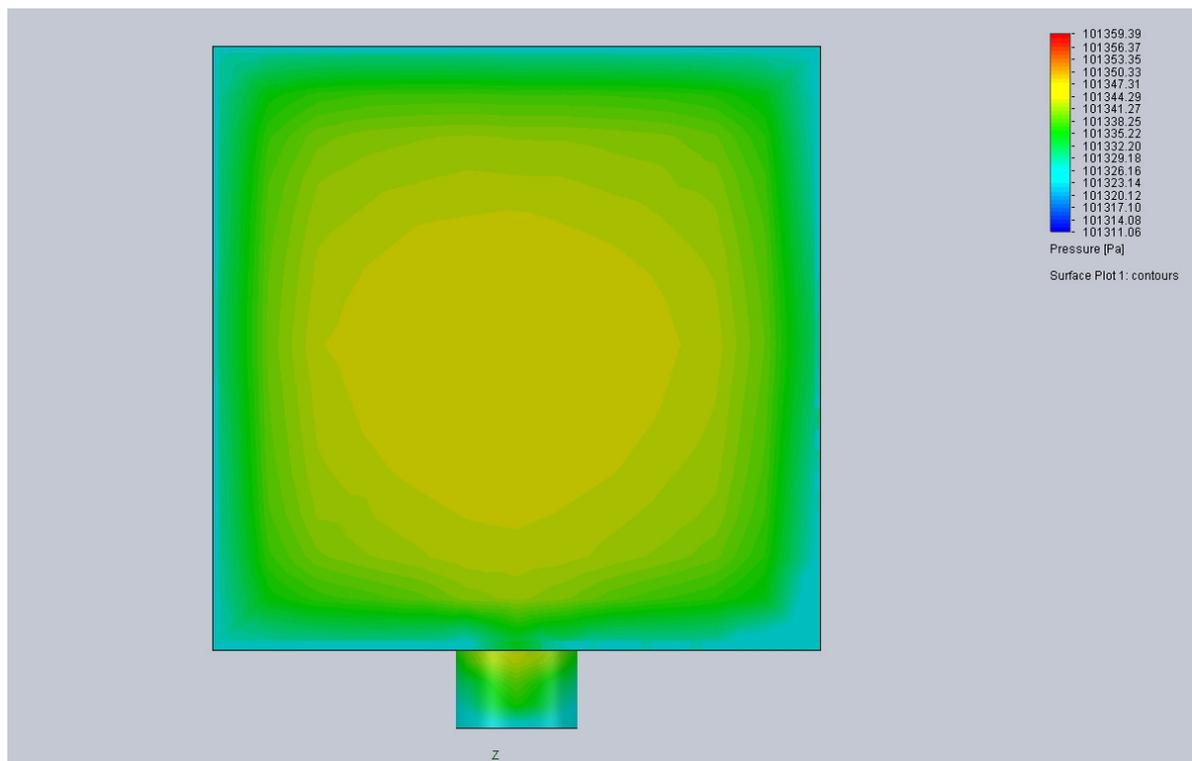


Figura 3.12 - Grafico della pressione esercitata dal vento (5m/s) sulla parte frontale del pannello di comando

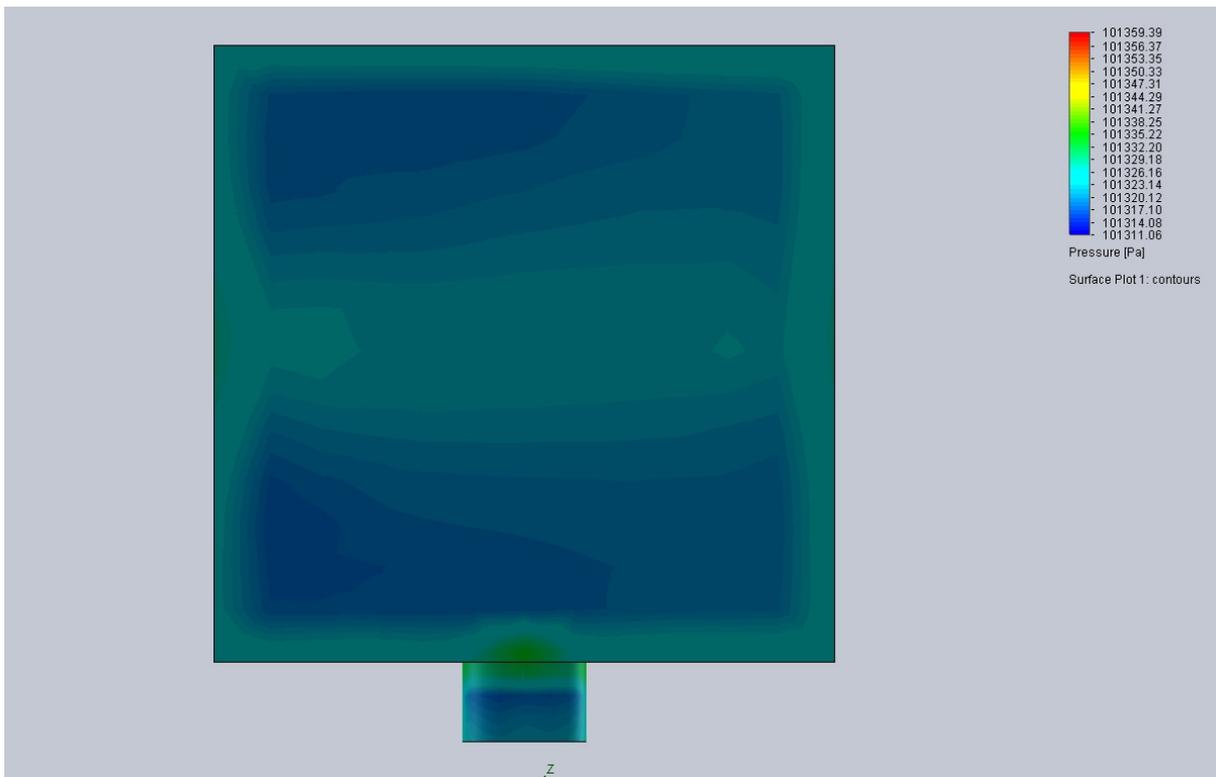


Figura 3.13 – Grafico della pressione esercitata dal vento (5m/s) sulla parte posteriore del pannello di comando

Tale superficie può essere ridotta ricorrendo a particolari accorgimenti tipo l'inserimento di una forza elastica. Quest'ultima possibilità consente inoltre di avere uno spostamento del connettore proporzionale all'intensità del vento e quindi di regolare la sua posizione in funzione di questa.

Ulteriori analisi dovranno essere effettuate per stabilire il profilo e il numero ottimali dei denti delle fasce estreme del connettore e degli alberi delle turbine, o se addirittura sostituire i denti con una superficie rugosa mediante solchi e rilievi paralleli all'asse, sia sulla superficie esterna del connettore che su quella interna e centrale degli alberi delle turbine.

Quello rappresentato nel modello 3D è solo una "idealizzazione": il principio che si intende trasmettere, su cui è basato il sistema, è che tra il connettore e gli elementi coassiali ad esso venga ridotto il più possibile l'attrito allo scorrimento assiale, mentre deve essere impedito lo scorrimento in direzione tangenziale quando necessario.

3.3.3 Considerazioni

Il modello così come concepito rappresenta un punto di partenza per ulteriori sviluppi. Infatti è possibile applicare la stessa soluzione usata per variare l'angolo di pitch per variare l'angolo di uscita delle pale, nonché la geometria del loro profilo. Si può quindi studiare la possibilità di un effetto combinato.

Il sistema di leve può essere sostituito da cavi. In tal caso il sistema molla-smorzatore andrà posizionato all'interno dei bracci. Un meccanismo simile è presente per esempio nei Kayak dotati di timone. Inoltre il pannello di comando può essere sostituito da un anemometro, eventualmente collegato al rotore della Savonius.

Il modello 3D rappresentato ha una funzione schematica. Non tiene conto delle reali relazioni geometriche tra gli elementi, ma ha lo scopo di fornire un'idea dei vincoli cinematici nonché del funzionamento complessivo. Non è specificato quindi in che modo il mozzo sarà reso solidale all'albero della Darrieus perché le geometrie andranno definite con gli studi successivi.

3.4 Definizione del profilo delle pale ottimizzato

Definito il modello preliminare come punto di partenza, si è proceduto con gli studi fluidodinamici per valutare l'effetto della variazione dell'angolo di calettamento in relazione all'intensità del vento. Al fine di procedere con la valutazione è stato necessario scegliere dapprima un profilo.

3.4.1 La scelta del profilo

Dopo uno studio di ricerca si è optato per un profilo laminare NACA a 5 cifre. La scelta è stata effettuata comparando tra loro i dati disponibili in letteratura e i risultati ottenuti dalle analisi eseguite su 5 profili, studiandone la potenza in funzione della velocità di rotazione per un valore della velocità del vento pari a 11m/s.

Il profilo che ha mostrato i risultati più soddisfacenti è il NACA 64(3)-418.

Scelto il profilo alare si è deciso di analizzare l'effetto della variazione dell'angolo di calettamento e quindi di scegliere l'angolo che fornisce le

migliori performance. Per effettuare questa scelta è stata fatta una campagna di analisi 2D con velocità del vento di 5, 7, 9 e 11 m/s e per ogni velocità del vento sono state realizzate 11 analisi con angoli di calettamento pari a -10,-8,-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 8 e 10.

Seguendo le linee guida utilizzate in precedenti studi, l'analisi CFD 2D è stata condotta utilizzando il codice CFD Fluent mentre le mesh sono state generate utilizzando il programma Icem. Per realizzare la mesh sono stati utilizzati 75.285 quadrilateri. Il metodo di analisi utilizzato è il moving mesh method caratterizzato dalla definizione di 3 domini di cui 2 fissi e uno rotante a varie velocità al cui interno si trovano le pale.

Per definire il comportamento fluidodinamico e meccanico della turbina è necessario ricostruire la sua curva di potenza; questa ricostruzione è stata eseguita per punti: fissata la velocità del vento a 11 m/s sono state effettuate 4 analisi a diversa velocità di rotazione in modo da poter calcolare il valore di coppia corrispondente a quella velocità del vento e a quella velocità di rotazione. Il valore della coppia per data velocità del vento e per data velocità di rotazione è naturalmente variabile e, in particolare, terminato il transitorio iniziale assume un andamento periodico con periodicità $\frac{2}{3}\pi$ essendo 3 le pale presenti nella turbina. Le analisi effettuate sono analisi transienti composte da 360 timesteps di 5° per un totale di 5 giri completi della turbina; si è visto infatti che il transitorio dura quasi 2 giri con la coppia che assume il suo caratteristico andamento periodico a partire dal terzo giro. Iniziamo a descrivere la mesh utilizzata: come detto è composta da 3 domini di cui 12 fissi e uno rotante come di seguito riportato:

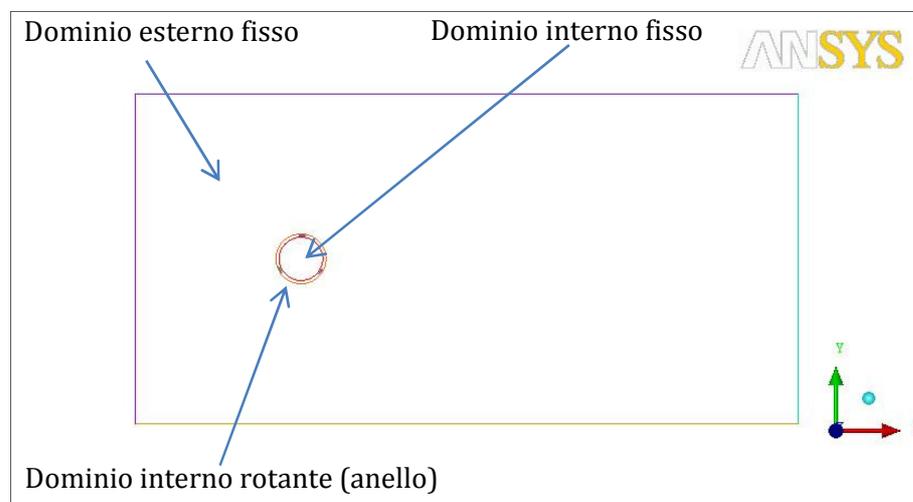


Figura 3.14 - domini

Per meglio apprezzare i 3 domini e soprattutto il dominio rotante con le pale al suo interno nella successiva figura viene riportato uno zoom della parte centrale con la definizione dei diversi tipi di condizioni al contorno:

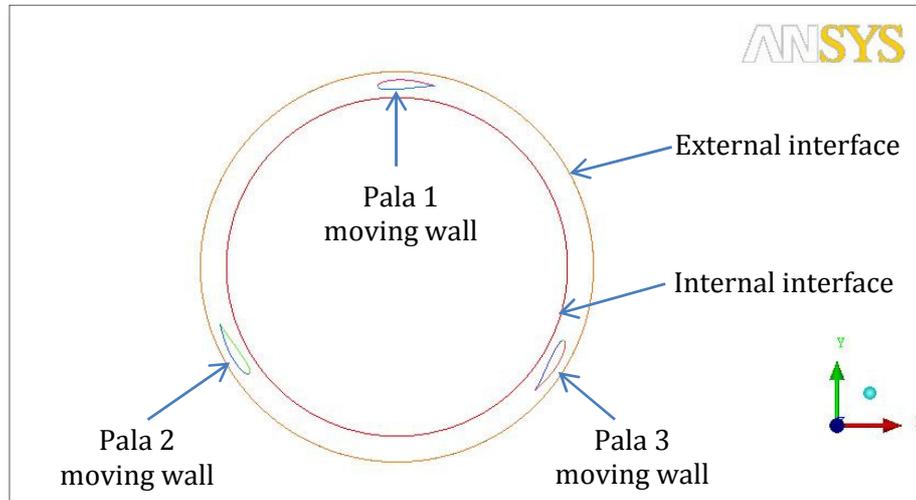


Figura 3.15 - Domini e condizioni al contorno nella zona centrale

I due cerchi che dividono i tre domini sono stati definiti interfacce in modo che si crei continuità tra i vari domini che hanno differenti velocità; le pale sono invece state definite come moving wall e gli è stata data la stessa velocità di rotazione del dominio ad anello nel quale si trovano.

Le condizioni al contorno esterne sono invece riportate nella seguente figura:

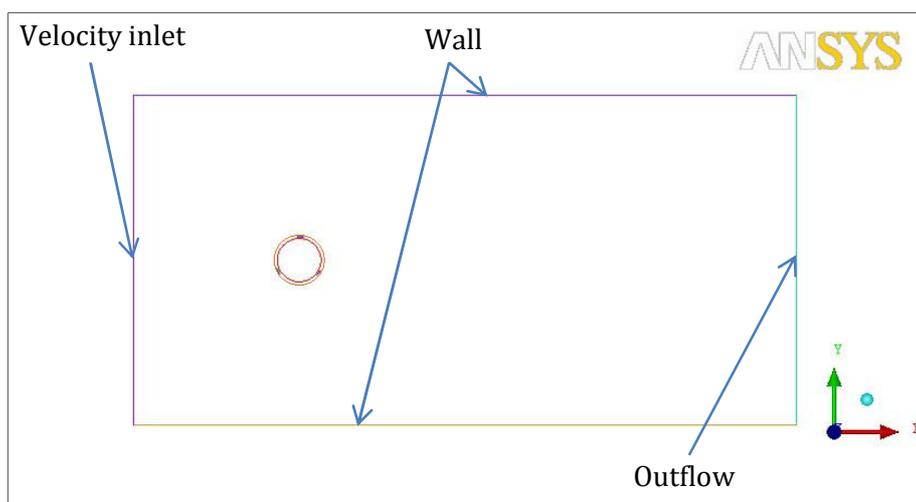


Figura 3.16 - Condizioni al contorno esterne

Definite le condizioni al contorno passiamo ad analizzare la mesh utilizzata. Come anticipato precedentemente è stata realizzata utilizzando 75.285 elementi quadrilateri per i tre domini.

Nelle seguenti figure si riporta il complessivo della mesh e una zoom della parte centrale in cui si trovano le pale:

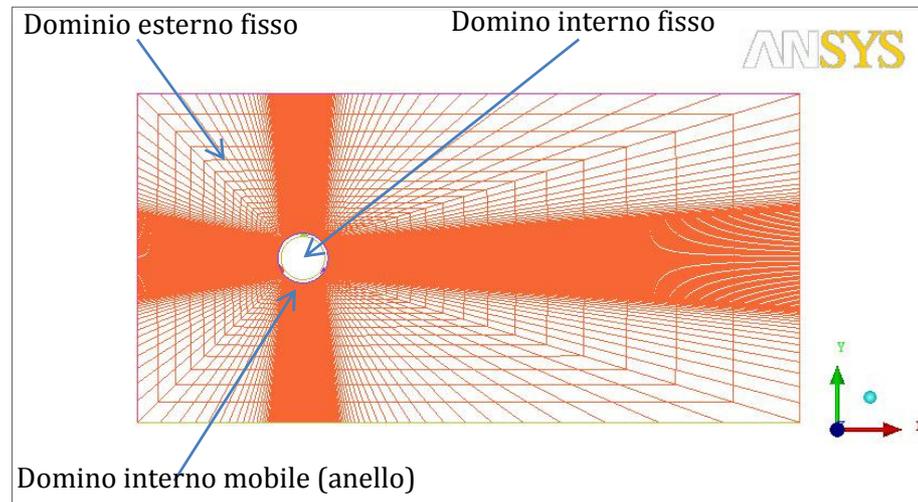


Figura 3.17 - Complessivo Mesh

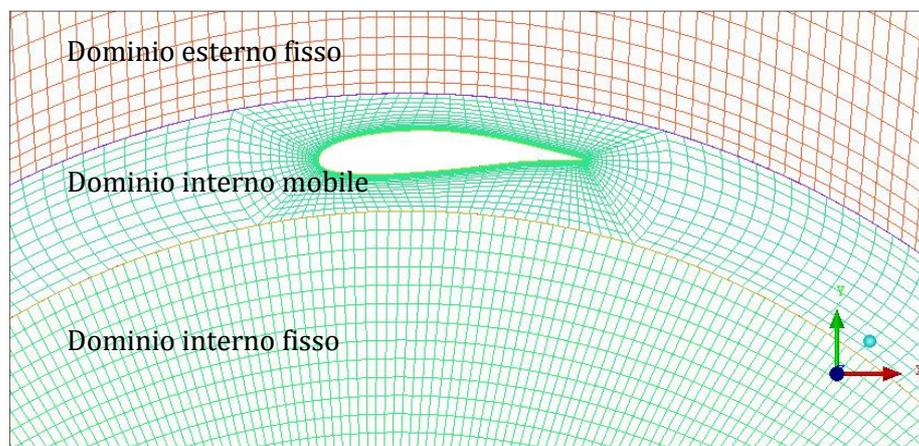


Figura 3.18 - Zoom Mesh zona centrale

Le analisi eseguita, come detto, sono state di tipo transiente con 360 timesteps da 5° e fissato all'inlet una velocità in ingresso di 11 m/s sono state realizzate 4 analisi con velocità di rotazione del dominio centrale e delle pale di 72, 144, 217 e 289 giri/min corrispondenti rispettivamente ad un rapporto λ tra la velocità periferica della pala e la velocità del vento di 0,5, 1, 1,5 e 2. Il solutore usato è stato di tipo pressure based, double precision mentre il modello di turbolenza è stato il realizable k-epsilon with enhanced

wall treatment. Infine è stato impostato uno schema di accoppiamento pressione-velocità di tipo PISO e una discretizzazione spaziale di secondo ordine. Di seguito vengono riportati i risultati dell'analisi; nella prima figura viene riportato il Contour of x velocity relativo a $\lambda=1,5$:

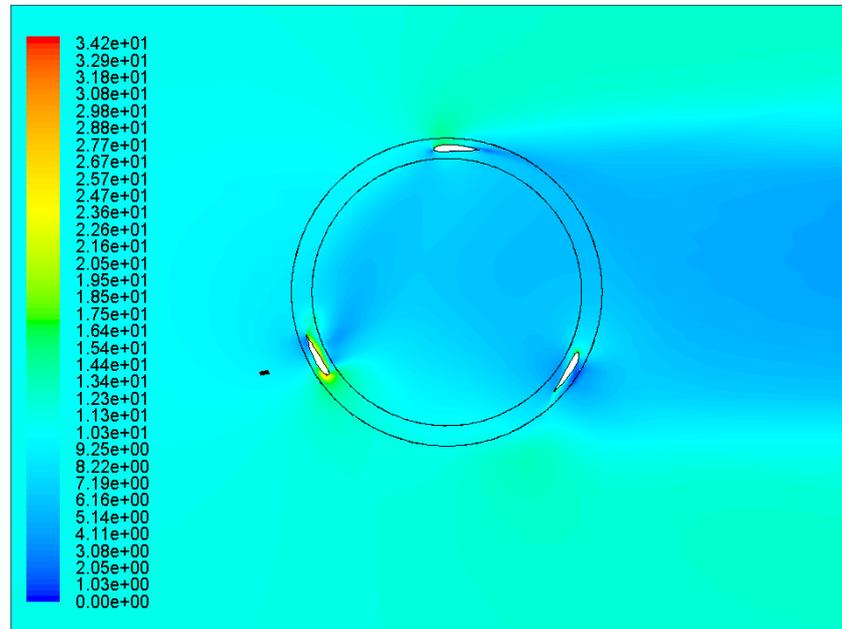


Figura 3.19 - Mappa delle velocità relativa a $\lambda=1,5$

I risultati di queste analisi sono riportati nel seguente grafico:

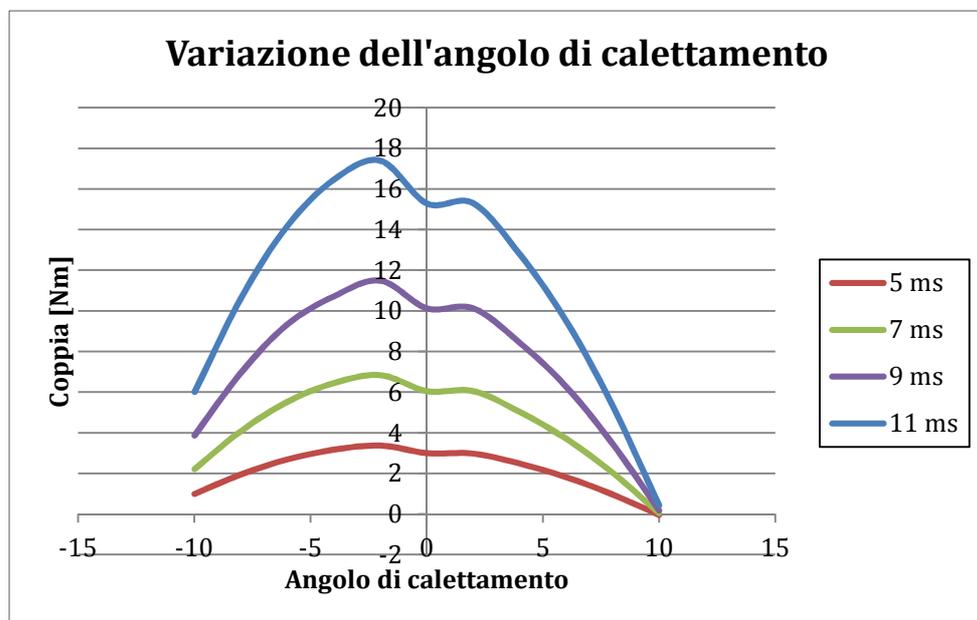


Figura 3.20 - Variazione dell'angolo di calettamento

Dal grafico risulta evidente come l'angolo che fornisce i risultati migliori in termini di coppia sia pari a 2° .

CAPITOLO 4

Il modello definitivo

4.1 Il modello finale

Il modello finale proposto è costituito dall'accoppiamento di due tipologie differenti di turbine, entrambe innovative (figura 4.1): una turbina a resistenza e una turbina a portanza. La prima ha lo scopo di avviare la turbina a portanza attraverso una trasmissione a "ruota libera", la cui coppia è troppo bassa per avviarsi da sola. L'innovazione consiste nella possibilità di variare la geometria delle pale del modello Darrieus in modo meccanico, in funzione della posizione della pala rispetto alla direzione del vento.

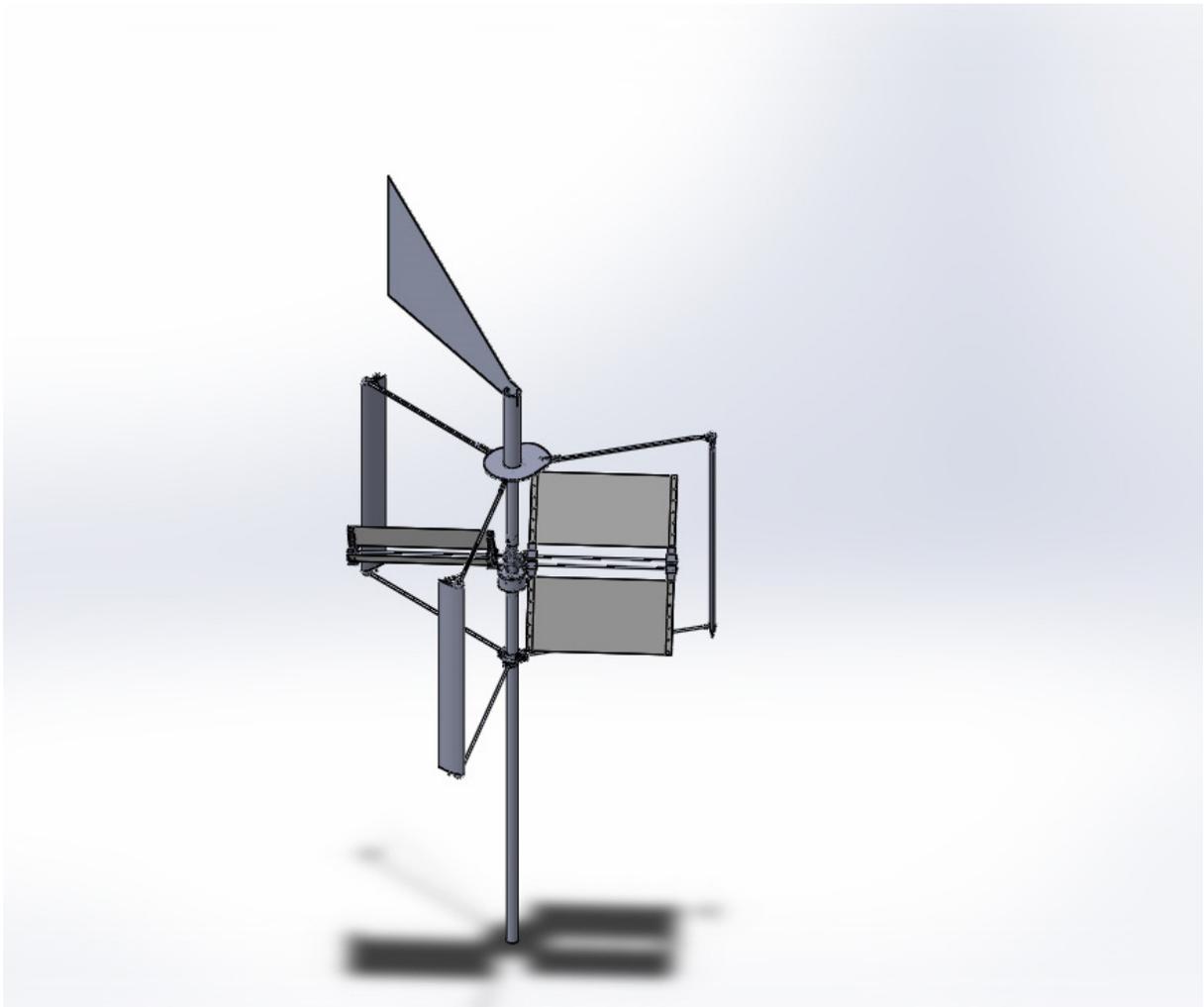


Figura 4.1 - Vista complessiva del modello ibrido

4.2 La turbina a resistenza

Per il modello di turbina a resistenza è stato scelto quello ideato dal Prof. Antonio Pantano dell'Università di Palermo, coperto da brevetto internazionale. In tale modello le pale sono collegate agli "assi porta pale" e possono ruotare attorno ad essi per un angolo di 90° .

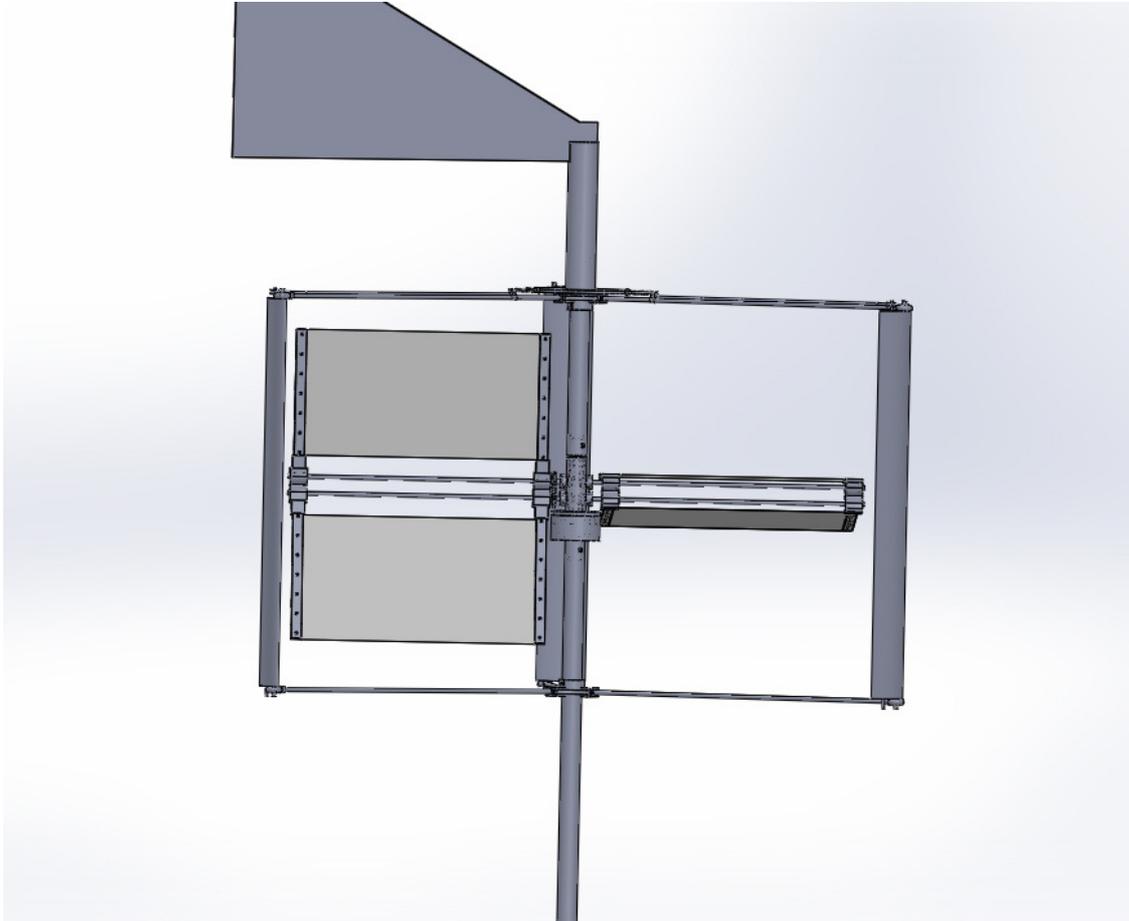


Figura 4.2 - Vista delle pale del rotore a resistenza: a sinistra dell'albero le vele aperte; a destra dell'albero, le vele chiuse.

Con riferimento alla figura 4.2, quando il vento colpisce frontalmente le pale a sinistra, queste sono vincolate a non flettersi attorno all'asse porta pale e trascinano in rotazione l'albero per mezzo degli assi porta pale. Compiuta una rotazione di 180° (in verso orario in questo caso), vengono a trovarsi in moto in direzione opposta al vento (le pale a destra dell'albero), il quale esercita una forza su ogni pala, generando una coppia lungo l'asse del porta pale. Non trovando questa volta vincoli che ne impediscano la rotazione attorno all'asse porta pale, entrambe le pale (in figura a sinistra rispetto all'albero) ruotano ma in versi opposti tra loro, disponendosi orizzontalmente in modo da non esporre superficie in direzione ortogonale a quella del vento. La forza resistente, così facendo, è ridotta al solo

contributo dell'attrito viscoso. Il sincronismo alla rotazione tra la vela superiore e quella inferiore è garantito da una coppia di ruote dentate, ben visibile in figura 4.3. Lo stesso ingranaggio annulla gli effetti della forza peso delle pale nella rotazione attorno al loro asse poiché per via del tipo di vincolo, i bracci delle vele possono ruotare solo in versi opposti tra loro, mentre la forza peso è responsabile di una coppia uguale per entrambe in direzione, verso e modulo.

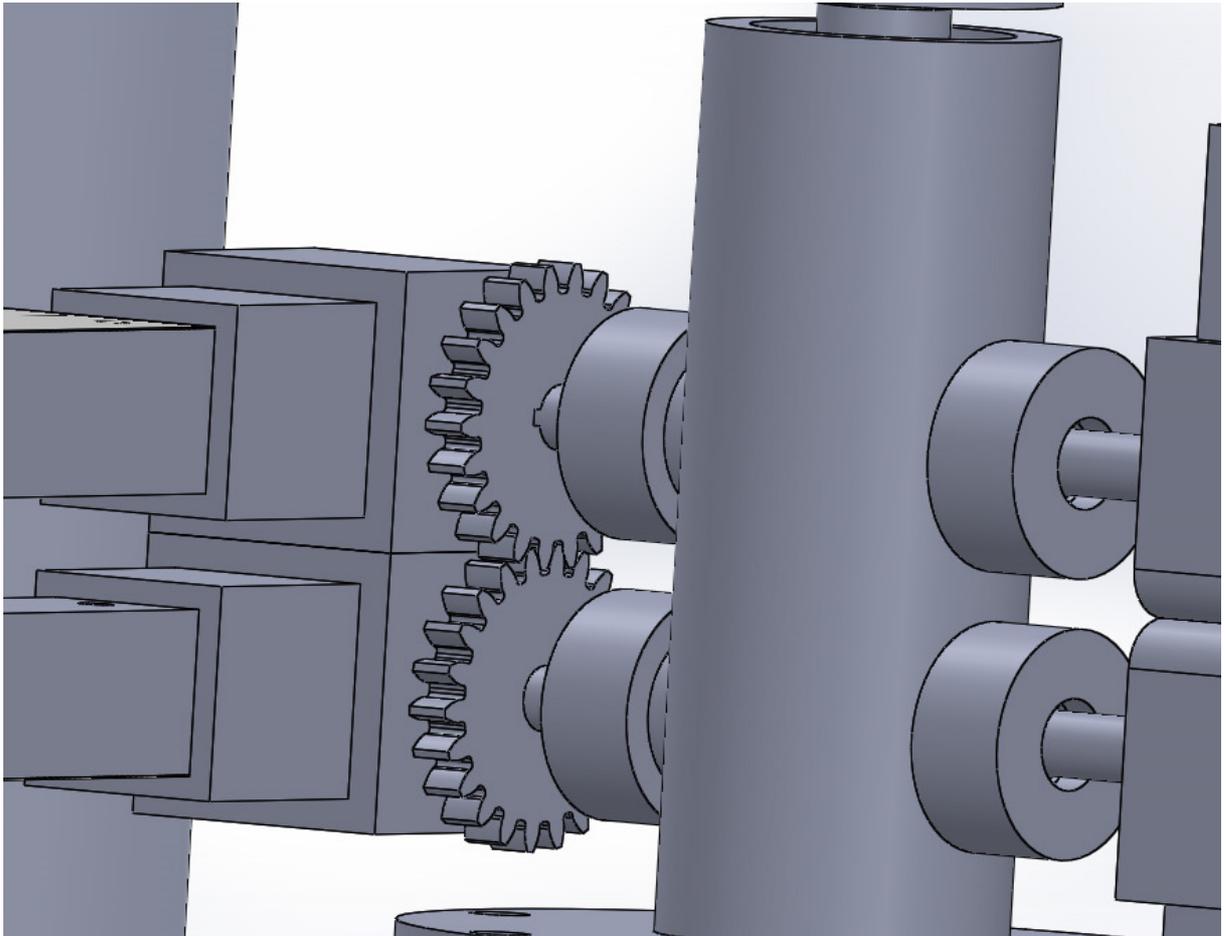


Figura 4.3 - Ingranaggio per il sincronismo della rotazione delle pale nel piano verticale

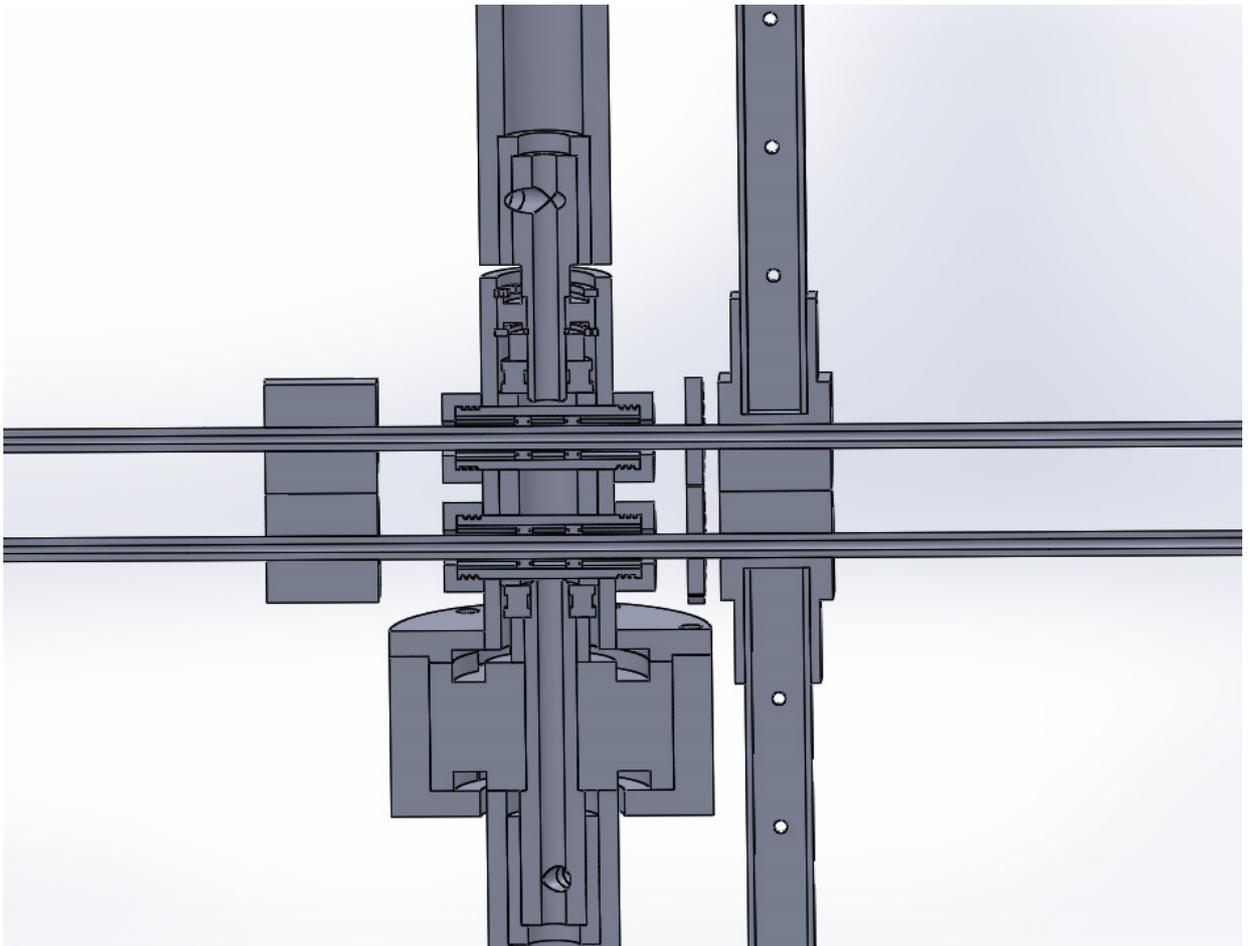


Figura 4.4 - Sezione longitudinale dell'assieme

La limitazione all'angolo di rotazione è ottenuta mediante un particolare profilo dell'elemento di collegamento tra braccio e asse porta pale.

Per rendere compatibile il modello della turbina a resistenza con quello a portanza e ridurre le vibrazioni, considerate le masse in moto, si è deciso di inserire il rotore della prima al centro di quello Darrieus. In questo modo l'albero può avere un'altezza minore con conseguente riduzione delle sollecitazioni alla base.

Per svincolare la rotazione di questo rotore dal mozzo superiore e dall'albero, si è fatto uso di un cuscinetto radiale, il cui anello esterno è interno al mozzo superiore che è collegato tramite le pale al resto del rotore Darrieus (l'albero). Oltre al cuscinetto è presente la ruota libera, posizionata all'interno dell'albero e che funge anche da cuscinetto.

Una modifica è stata apportata al telaio delle pale: si è deciso di eliminare il tubo a sezione circolare che collega le estremità non vincolate dai bracci al fine di alleggerire la struttura. Inoltre si prevede di fissare la vela ai bracci utilizzando un laccetto da far passare in appositi fori realizzati sugli stessi.

Per il dimensionamento degli elementi ci si è attenuti ai risultati dello studio curato dal professor Pantano.

4.3 La turbina a portanza

La turbina a portanza o di Darrieus presenta geometria variabile. La variazione della configurazione avviene in maniera meccanica, senza l'uso di sensori o strumenti elettronici.

4.3.1 Struttura e geometrie

Al solo scopo di avere un metro di confronto si è deciso di riprodurre di base il modello della turbina ibrida a geometria variabile di cui in figura 4.5 è riportata un'immagine, presentata nel lavoro di tesi di dottorato: "Sviluppo di una innovativa turbina eolica urbana", dell'Ing. Mungiovino Francesco dell'Università di Palermo. Su tale modello sono state poi apportate le modifiche relative alle pale. Anche in questo caso gli elementi sono stati dimensionati tenendo presenti i dati progettuali del modello di riferimento, in particolare la velocità di cut-off, pari a 18 m/s e il numero di giri massimo. Ulteriore criterio di progettazione è stato quello di puntare a una maggiore facilità di montaggio e smontaggio per ispezioni e sostituzioni.



Figura 4.5 - Turbina ibrida elaborata dall'ing. Francesco Mungiovino dell'Università degli Studi di Palermo.

4.3.2 Dimensionamento albero

Per quel che riguarda l'albero, si è scelto come materiale l'acciaio S355J2H, di cui sono riportate le caratteristiche meccaniche in tabella 1.

Acciaio	R [N/nm ²]	Rs min [N/nm ²]	Amin. %	J min
S355J2H	510-660	355	20	27

Tabella 4.1 - Proprietà meccaniche del materiale scelto.

Si è assecondata l'idea di utilizzare un albero diviso in più tronchi, dei quali quello superiore a sezione costante, su cui poi andranno saldate le flange per la connessione, tramite bracci, delle pale della Darrieus. La scelta rientra nell'ottica di una produzione industriale, per la quale risulta economicamente svantaggioso tornire un albero per tutta la sua lunghezza.

L'intera struttura è dimensionata a partire dalla sollecitazione al vincolo di incastro, all'altezza dei due cuscinetti del tronco inferiore. Il modulo del momento flettente è stato considerato pari a quello ottenuto nello studio del modello di riferimento, in quanto derivante dal contributo della turbina Darrieus (geometricamente identica) e della turbina a resistenza, che espone al vento la stessa superficie delle pale mobili della stessa turbina di riferimento. Sulla base delle suddette ragioni si evita di fornire in questa sede l'analisi per la determinazione delle sollecitazioni, per la quale si rimanda invece alla lettura del lavoro dell'Ing. Mungiovino. E' stato quindi calcolato tramite foglio Excel, il coefficiente di sicurezza a fatica nel punto di minimo spessore, cioè alla base dell'innesto tra il tronco inferiore e quello medio, ipotizzando anche un momento flettente doppio rispetto a quello reale. Sono riportati in tabella 4.2 i parametri per il calcolo e il risultato. Il valore del coefficiente è il risultato di una scelta di compromesso tra l'esigenza di avere diametri facilmente reperibili sul mercato riducendo al minimo le lavorazioni e i vincoli geometrici dei cuscinetti alla base dell'albero, che si è deciso di lasciare immutati dal modello preso in considerazione.

Coefficiente di sicurezza albero	
D Diametro esterno [m]	0,088
d diametro interno [m]	0,0766
rc (raccordo spallamento) [mm]	4
Mt momento torcente	30
Mf [Nm] Momento flettente	2187
I [m ⁴] momento d'inerzia	1,25E-06
Wf [m ³] Modulo di resistenza	2,85E-05
σ_a [N/mm ²] tensione altern.	77
σ_m [N/mm ²] tensione media	1
σ_e [N/mm ²] tensione limite di fatica	300
σ_r [N/mm ²] tensione limite a rottura	600
ka coeff.	0,96
kb coeff.	0,775
kc coeff.	0,814
D/d	1,149
rc/d	0,052
q sensitività	0,83
kt coeff.	1,9
kf coeff	1,747
$\sigma_{e amm}$ [N/mm ²] limite ammissibile a fatica	104
Coefficiente di sicurezza	1,36

Tabella 4.2 - Tabella relativa ai dati per il dimensionamento della sezione dell'albero più sollecitata, con momento flettente circa il doppio rispetto a quello della turbina di riferimento.

In tabella 4.3 sono descritte le caratteristiche dei cuscinetti.

Dati di calcolo

Coefficiente di carico dinamico	C	127	kN
Coefficiente di carico statico di base	C_0	93	kN
Carico limite di fatica	P_u	3.35	kN
Velocità di riferimento		7500	r/min
Velocità limite		3800	r/min
Fattore di calcolo	k_r	0.025	
Fattore di calcolo	f_0	14.4	

Massa

Massa cuscinetto		3.28	kg
	d	100	mm
	D	180	mm
	B	34	mm

Tabella 4.3 a) Caratteristiche e ingombri del cuscinetto SKF 6621-2Z

Dati di calcolo

Coefficiente di carico dinamico	C	140	kN
Coefficiente di carico statico di base	C_0	104	kN
Carico limite di fatica	P_u	3.65	kN
Velocità di riferimento		7000	r/min
Velocità limite		4500	r/min
Fattore di calcolo	k_r	0.025	
Fattore di calcolo	f_0	14.4	

Massa

Massa cuscinetto		3.83	kg
	d	105	mm
	D	190	mm
	B	36	mm

Tabella 4.3 b) Caratteristiche e ingombri del cuscinetto SKF 6620-2Z

4.4 Turbina Darrieus a geometria variabile

Per quel che riguarda la struttura delle pale della Darrieus, è stata rispettata non solo la geometria della turbina di riferimento, ma anche il materiale e la tecnica di realizzazione. Si è cercato di riprodurre un modello il più possibile simile a uno preso come riferimento in maniera tale da isolare le differenze nei risultati finali e quantificare meglio il peso dell'innovazione, al fine di poter intervenire per eventuali modifiche.

La geometria varia in funzione della posizione della pala rispetto a direzione e verso del vento. Per ottenere questo risultato ci si è ispirati al "piattello oscillante" dei rotori degli elicotteri.

Una "camma" giacente nel piano orizzontale (figura 4.6) è situata poco sopra i bracci superiori della Darrieus. La camma è resa solidale a una banderuola (a cui è collegata tramite un cilindro cavo coassiale all'albero). In questo modo, una volta che la banderuola si è allineata col vento, rimane fissata anche la posizione della camma.

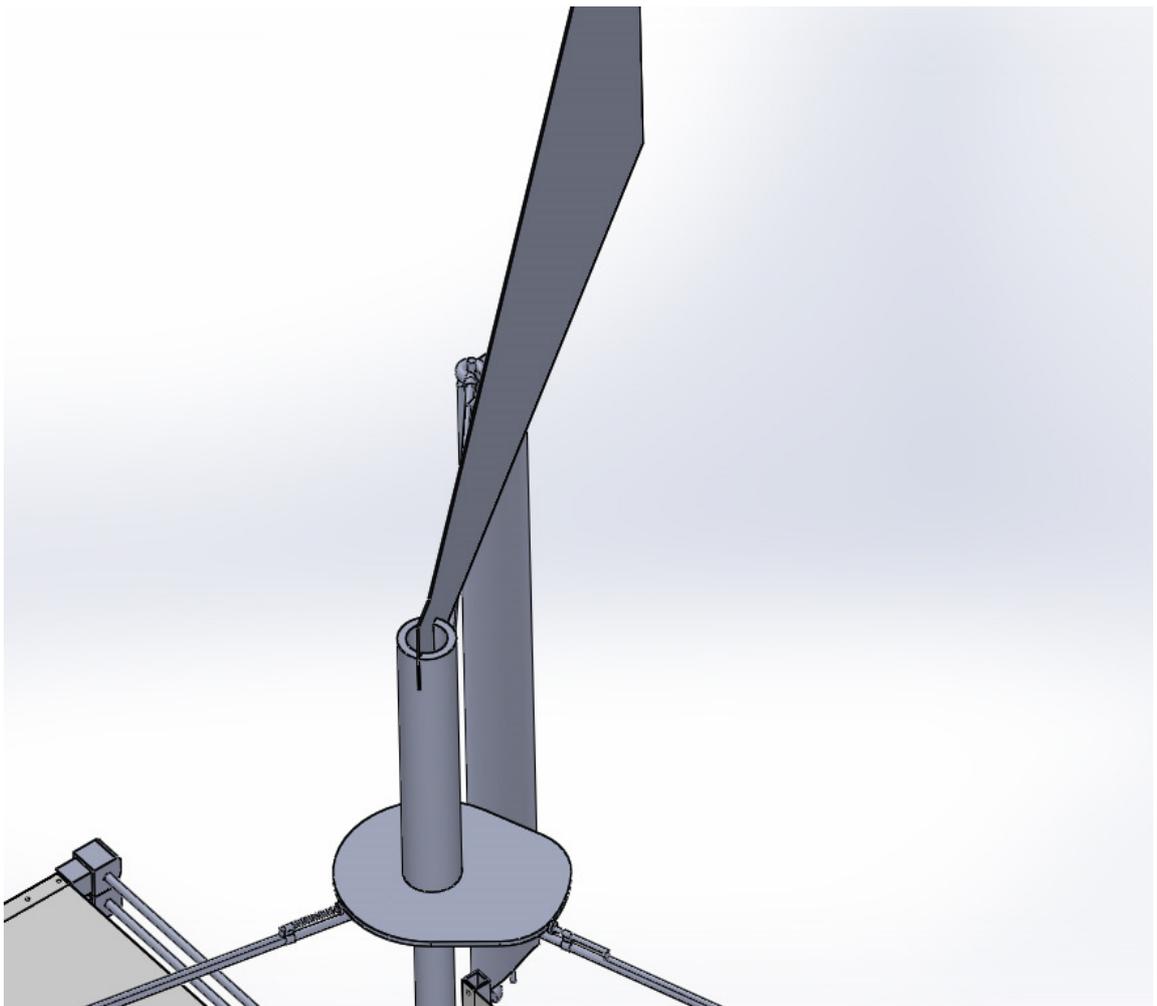


Figura 4.6 - Camma e Banderuola ben visibili

L'angolo tra l'asse maggiore della camma e quello della banderuola è determinante per la posizione in cui far variare l'angolo di calettamento della pala rispetto alla direzione del vento. Il profilo della camma, invece, incide sulla rapidità della variazione, sugli effetti dell'interazione tra punteria e camma e soprattutto sulla variazione dell'angolo di calettamento della pala. Un'asta di comando (una per ogni pala) posta sopra il braccio superiore e parallela ad esso, libera di scorrere all'interno di guide, collega il profilo della camma alla pala. La parte a contatto con la camma si può spiegare come la punta di una penna a sfera. Questo per ridurre al minimo l'attrito tra le parti. Una molla opportunamente dimensionata, garantisce che la punta dell'asta sia sempre a contatto con la camma (figura 4.7).

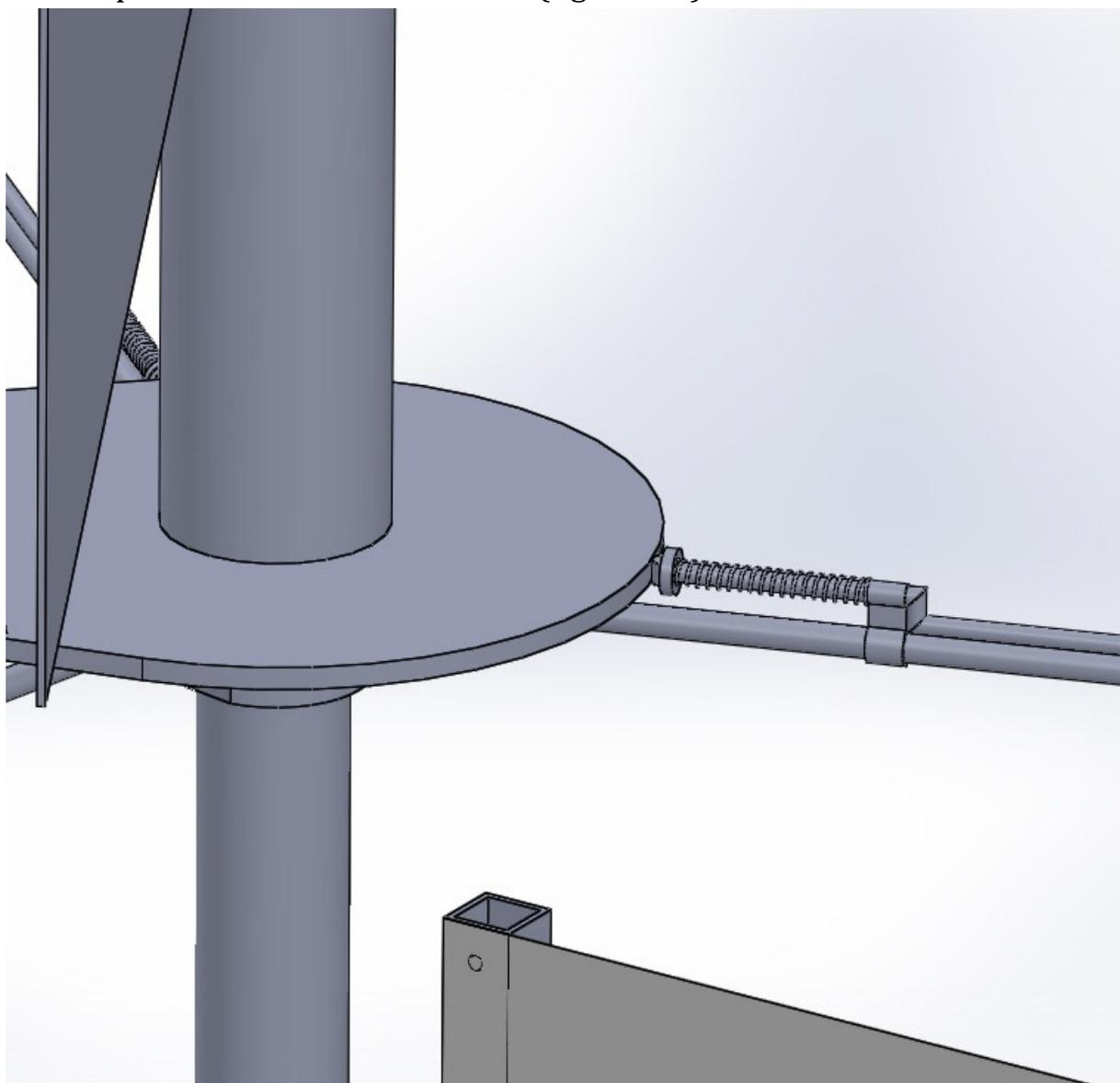


Figura 4.7 - Asta di comando e molla di ritorno

L'angolo scelto tra l'asse della banderuola e quello maggiore della camma è di 90° , con la punta di quest'ultima orientata in modo tale che quando ogni pala si trova a percorrere il tratto controvento, l'assetto di ognuna è quello tipico di una turbina Darrieus, con funzionamento a portanza (figura 4.8a). Invece quando la pala si trova a percorrere il tratto in cui la sua velocità tangenziale è concorde a quella del vento, l'asta di comando seguendo il profilo della camma scorre in direzione radiale rispetto all'asse dell'albero, verso l'esterno, facendo così ruotare la pala attorno a un asse verticale passante per i suoi vertici in modo che il suo intradosso venga investito quasi frontalmente dal vento, sfruttando così l'effetto della resistenza opposta al vento (figura 4.8b).

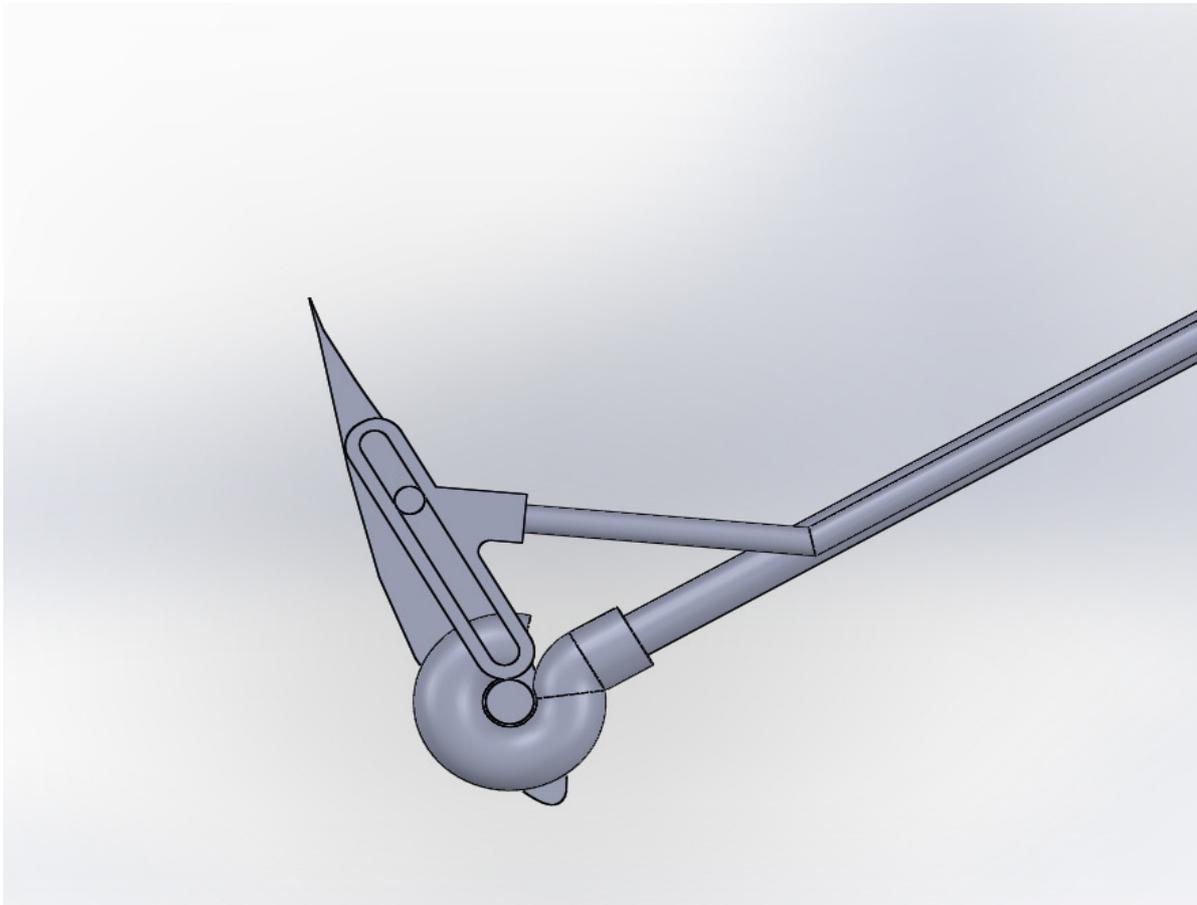


Figura 4.8 a) - Estremità dell'asta di comando in modalità di funzionamento a portanza della pala

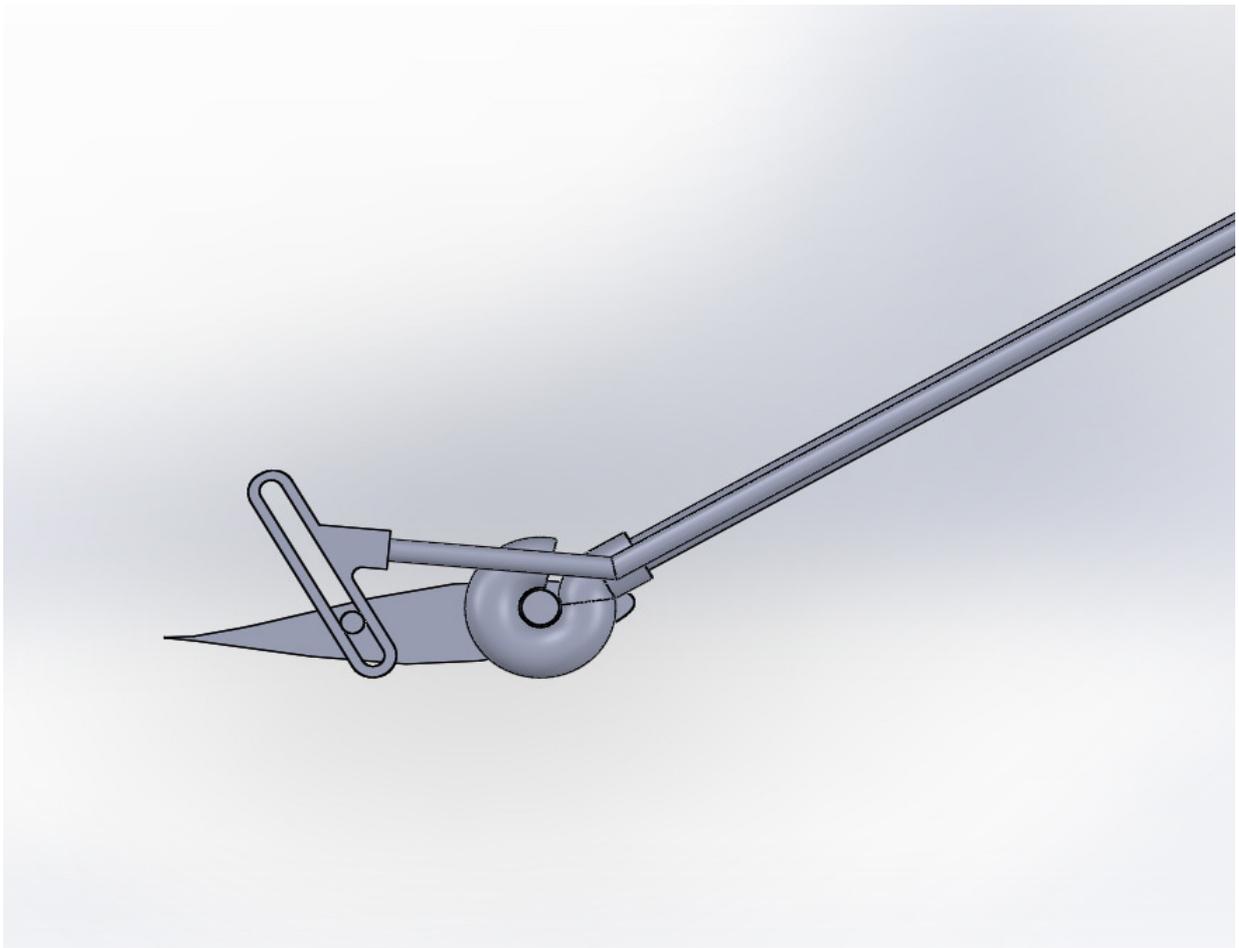


Figura 4.8 b) - Estremità dell'asta di comando in configurazione di funzionamento a resistenza della pala.

In questo modo è possibile incrementare la coppia media. Se l'alternanza del funzionamento portanza-resistenza non dovesse rivelarsi efficace, è sempre possibile scegliere un valore diverso dell'angolo tra l'asse della banderuola e quello maggiore della camma e modificare il profilo di questa. In ultimo si può scegliere una configurazione diversa dell'asta di comando, in modo da ottenere una portanza maggiore nella posizione in cui normalmente diminuisce (posizione che dipende dal profilo scelto). In ogni caso è possibile scegliere la posizione in cui far variare l'angolo di calettamento della pala Darrieus, rispetto alla direzione del vento, come pure la durata dell'assetto variato, o addirittura variarlo più volte in un solo giro.

4.4.1 Bracci per le pale Darrieus

Per la realizzazione dei bracci delle pale Darrieus si è optato per i tubi di acciaio E235 senza saldatura trafilati a freddo, di cui si riportano nella tabella 4.4 le caratteristiche meccaniche. Anche in questo caso, il coefficiente di

sicurezza (tabella 4.5) è stato ottenuto considerando la sollecitazione a flessione e normale della Darrieus di riferimento prodotte dalle forze:

- Tangenziale $F_t = 621\text{N}$
- Centrifuga $F_c = 1950\text{ N}$
- Peso $P = 25\text{ N}$

Le prime due, essendo relative a uno solo dei tre bracci per pala del modello iniziale sono state ottenute moltiplicando per il coefficiente $3/2$ i valori riportati nello studio dell'ingegner Mungiovino.

Acciaio	R [N/nm ²]	Rs min [N/nm ²]	Amin. %	Stato di fornitura
E235	340-440	235	27	N

Tabella 4.4 - Proprietà meccaniche dell'acciaio scelto per i bracci della turbina Darrieus

Coeff. di sicurezza braccio	
s spessore [m]	0,004
D diametro esterno [m]	0,025
d diametro interno [m]	0,017
b braccio [m]	0,7
A [mm ²] area anulare	1055,04
Fc Forza centrifuga [N]	1950
P Forza peso [N]	25
Ft Forza tangenziale [N]	621
Mp Momento forza peso [Nm]	17,5
Mt Momento forza tan. [Nm]	434,7
Mtot Momento totale [Nm]	435
I Mom. d'inerzia [m ⁴]	0,00000001506729
Wf Modulo di resistenza [m ³]	0,0000012053832
smax Tensione massima	362,7725912
sr Tensione a rottura	390
Coeff. Sicur.	1,08

Tabella 4.5- Dati relativi al dimensionamento dei bracci delle pale Darrieus

Per il prototipo si prevede la possibilità di regolare durante i test la forza elastica che deve mantenere l'estremità dell'asta di comando aderente alla camma. Per la realizzazione del prototipo sono state utilizzate tecniche costruttive semplificative dovute anche alla difficoltà di reperire sul mercato pezzi per la realizzazione di un singolo prodotto.

CAPITOLO 5

Il prototipo

5.1 La realizzazione del prototipo

Per validare i principi costruttivi di base del progetto si è deciso di realizzare un prototipo sul quale effettuare i test. Il sistema è stato concepito secondo un funzionamento del tipo ad isola con batterie di accumulo. Lo schema generale è il seguente:

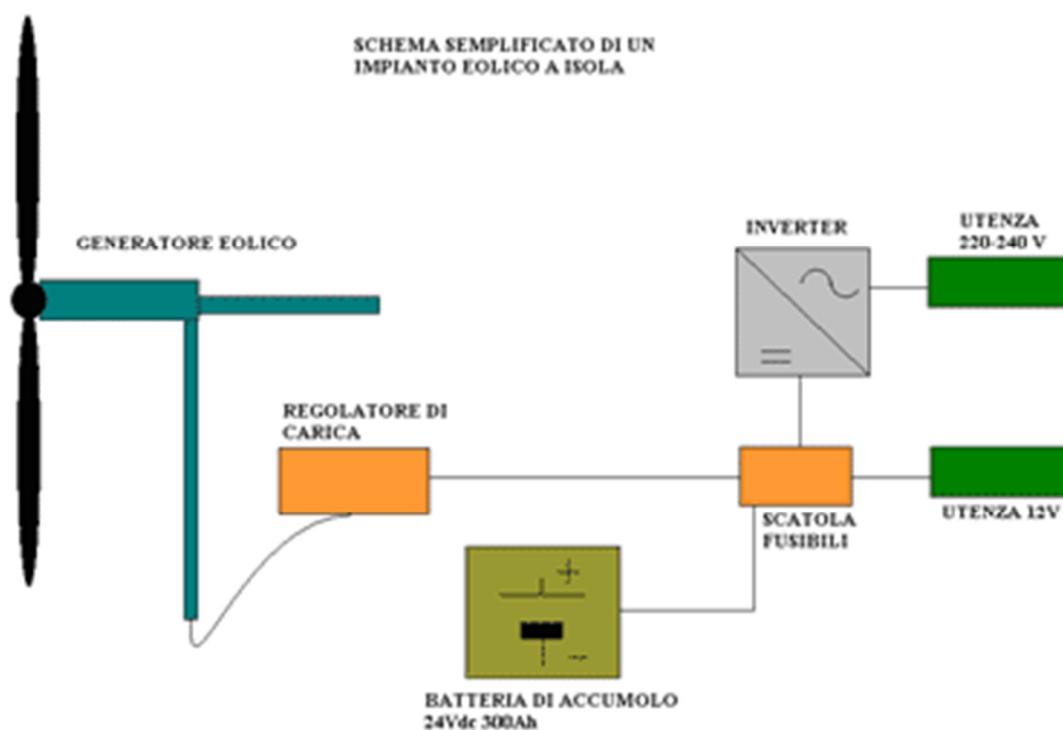


Figura 5.1 - Schema impianto eolico ad isola

Nella fattispecie lo schema unifilare realizzato è di seguito riportato:

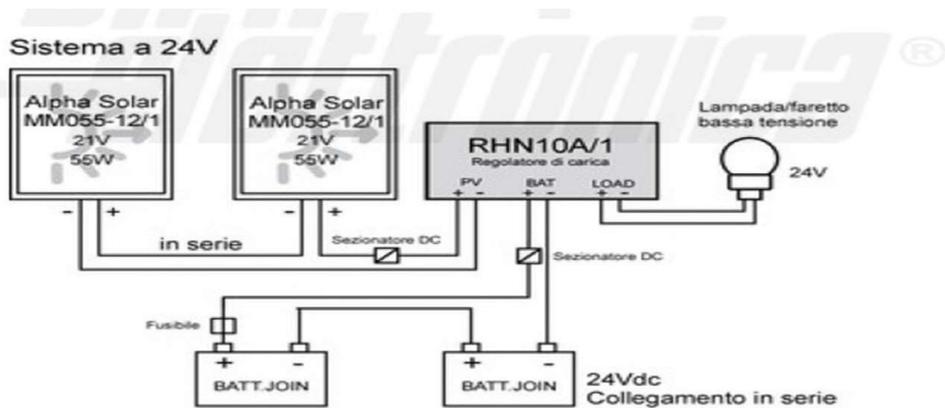


Figura 5.2 - Schema unifilare turbina per test

Di seguito vengono riportati i componenti elettrici scelti:

Immagine	Componente	Caratteristiche principali	Quantità
	Regolatore di carica	Regolatore di carica modello JOIN RHN 10 A - V Max 50 V - Carico 10 A - Autoconsumo: 6mA - Fine carica: 13,8V (27,6V) - Equalizzazione (10'): 14,6V (29,2V)	1
	Inverter	Inverter Alcapower modello Ap12 600 NS - Soft Start DC-AC ad onda sinusoidale Pura 12V 600W - Ingresso: 11-15 Vcc - Uscita: 220 V Ac - Frequenza: 50 Hz +/- 1% errore - Potenza: 600 W continua	1
	Batteria di accumulo	AGM - 12 V C20/20 103 Ah Max (5s) 800 A - Max Carica 27 A Cicli garantiti 250 - Tensione limite di scarica : 10,6 V - Assorbimento 14,4 a 14,7 V - Floating 13,6 A 13,8 V	1
	Batteria di accumulo	LUMINOR - Uso in standby 13,5 13,8 - Corrente iniziale <24 A - Capacità 80 Ah	1

Figura 5.3 - I componenti elettrici

5.2 Realizzazione componenti e loro assemblaggio

5.2.1 Le pale

Per la realizzazione delle pale del prototipo, a causa della difficoltà nell'ottenere modelli in vetroresina piuttosto elaborati come quelli che ci si era prefissato di fare, in numero molto limitato di pezzi, si è inizialmente fatto ricorso a una tecnica più tradizionale, presa dall'aeromodellismo, basata sulla presenza di una struttura interna di centine in compensato realizzate con taglio laser dallo studio 3D Box Creative Lab di Bari, rivestita da un foglio sottile di fibra di vetro.



Figura 5.4 - Preparazione delle anime delle pale



Fi

Figura 5.5 - Preparazione del modello delle pale per stampo in fibra di vetro

Successivamente si è studiata la possibilità di utilizzare le moderne tecnologie di additive manufacturing utilizzando un materiale innovativo per prodotti stampati in 3D: la fibra di Nylon-Carbon, un composito a base di fibre di carbonio, perfetto per realizzare oggetti ultra leggeri e resistenti oltre che ad alte temperature anche a tensioni e impatti. Si è optato quindi per la realizzazione delle pale tramite stampante 3D, che ha consentito di ottenere un modello già pronto della parte esterna di ogni pala, di spessore 1mm, creando così una struttura molto leggera e resistente. Tale tecnologia si presta in maniera eccellente per la realizzazione di prototipi o di piccole serie di produzione, poiché pur essendo un processo relativamente dispendioso, consente di risparmiare sui costi di realizzazione degli stampi e consente di modificare rapidamente le forme geometriche delle pale qualora questo si rendesse necessario. Di contro i tempi di stampaggio sono relativamente lunghi: si tenga conto che la stampa completa di una sola pala (ciascuna pala è stata stampata in tre pezzi, successivamente incollati con resine polimeriche) richiede circa 20h di lavorazione continua per un costo di stampaggio di circa 600€ cadauna. Terminato il processo di stampaggio occorre raffreddare i pezzi a temperatura controllata per ulteriori 4h, infine

i pezzi, che presentano una elevata rugosità superficiale, vanno levigati e verniciati.



Figura 5.6 - Pale realizzate tramite stampa 3D in Nylon-Carbon (non verniciate)



Figura 5.7 - Pale ed altri componenti realizzati tramite stampa 3D

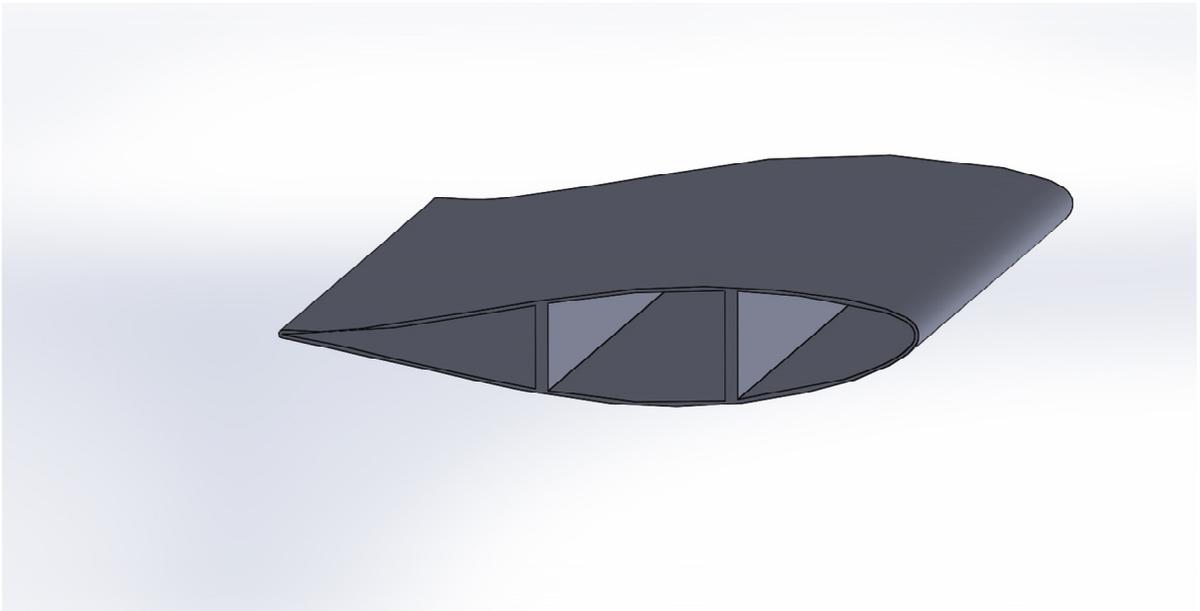


Figura 5.8 - CAD della sezione della pala con nervature interne

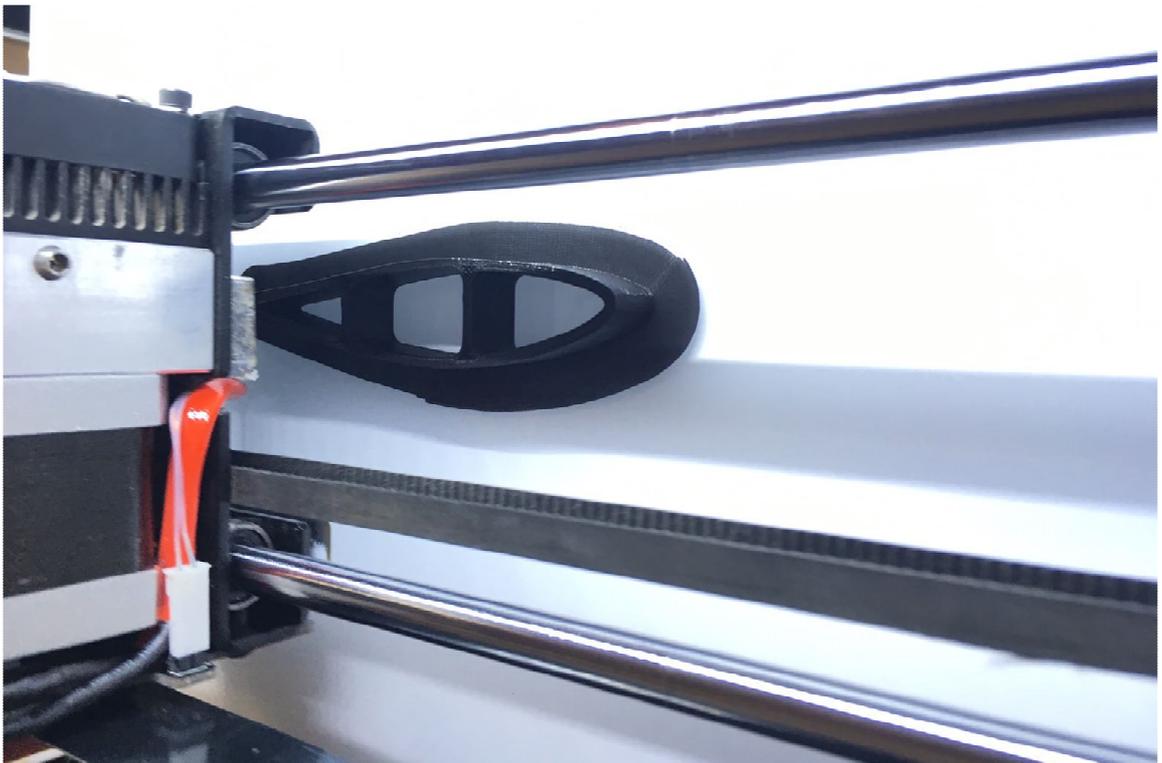


Figura 5.9 - Fase di stampa 3D in Nylon-Carbon del profilo della pala con nervature interne

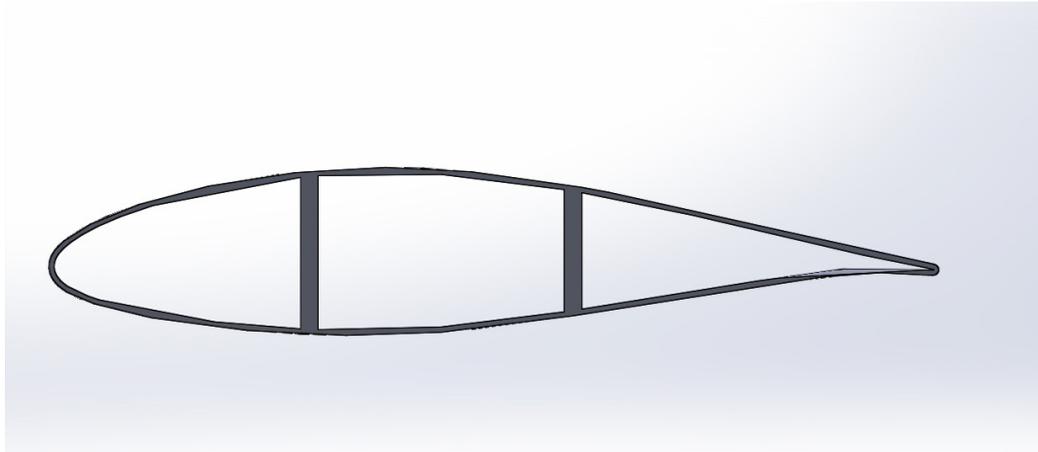


Figura 5.10 - Vista in sezione della pala

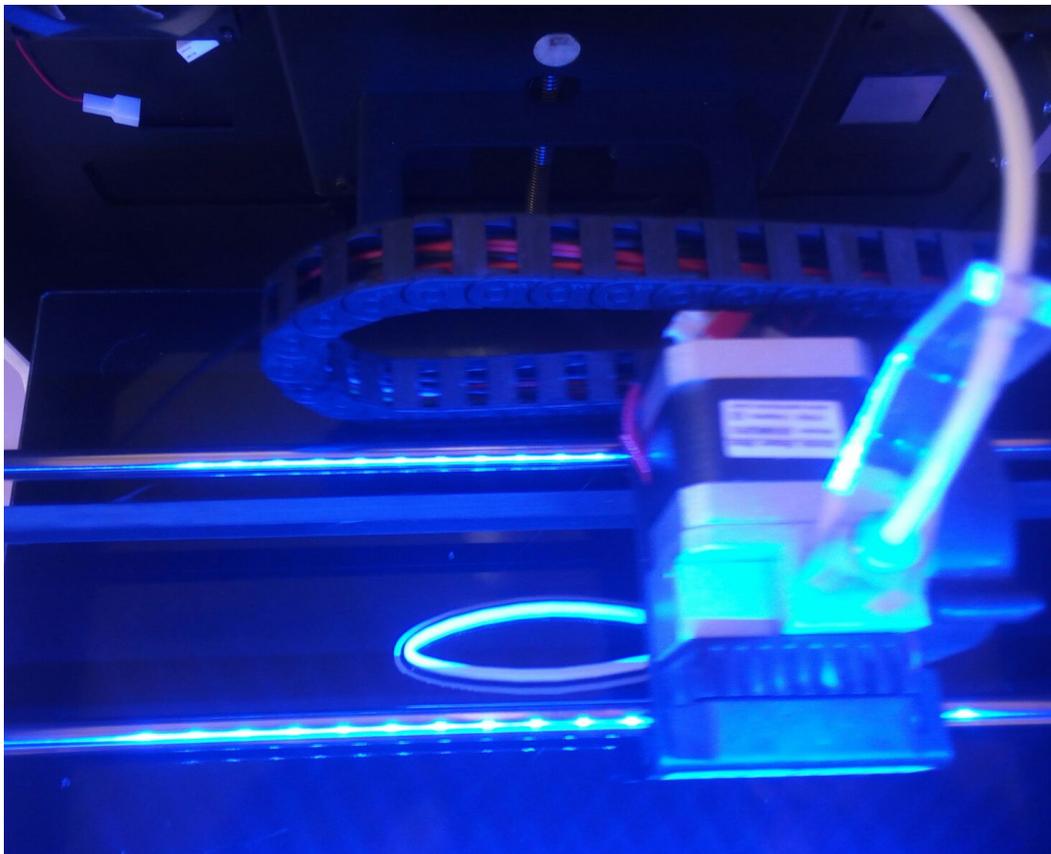


Figura 5.11.a - Fasi di stampaggio del profilo della pala

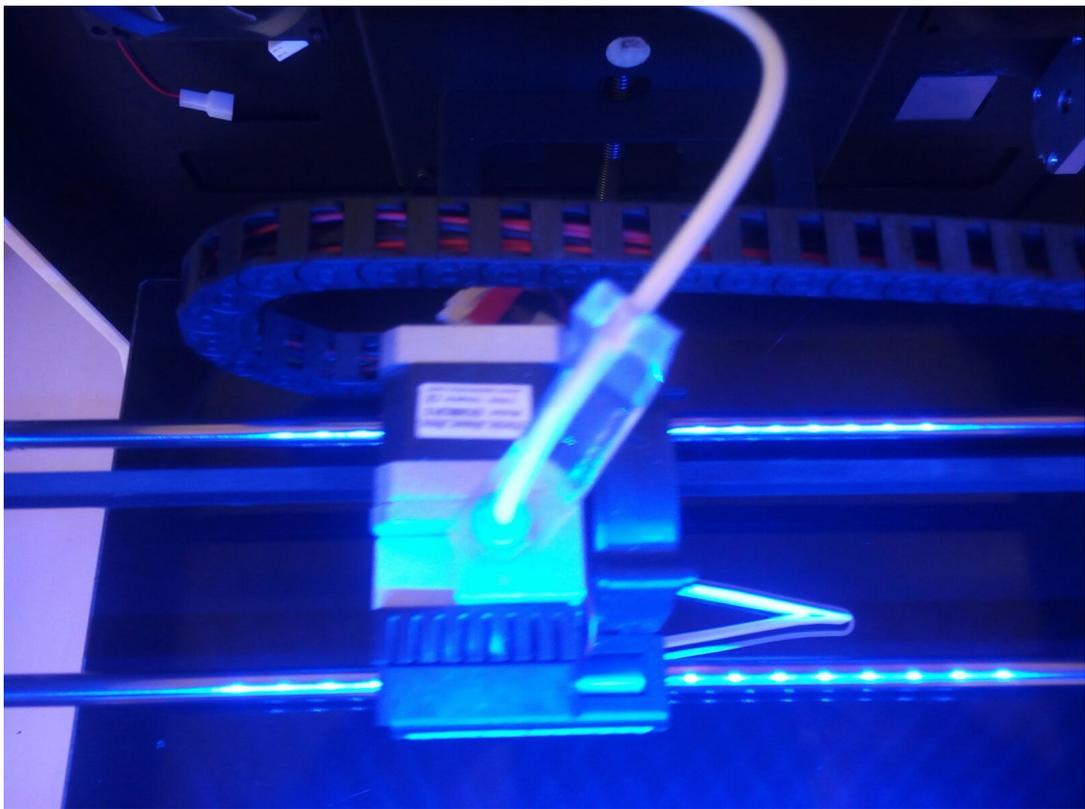


Figura 5.11.b - Fasi di stampaggio del profilo della pala



Figura 5.11.c - Fasi di stampaggio del profilo della pala

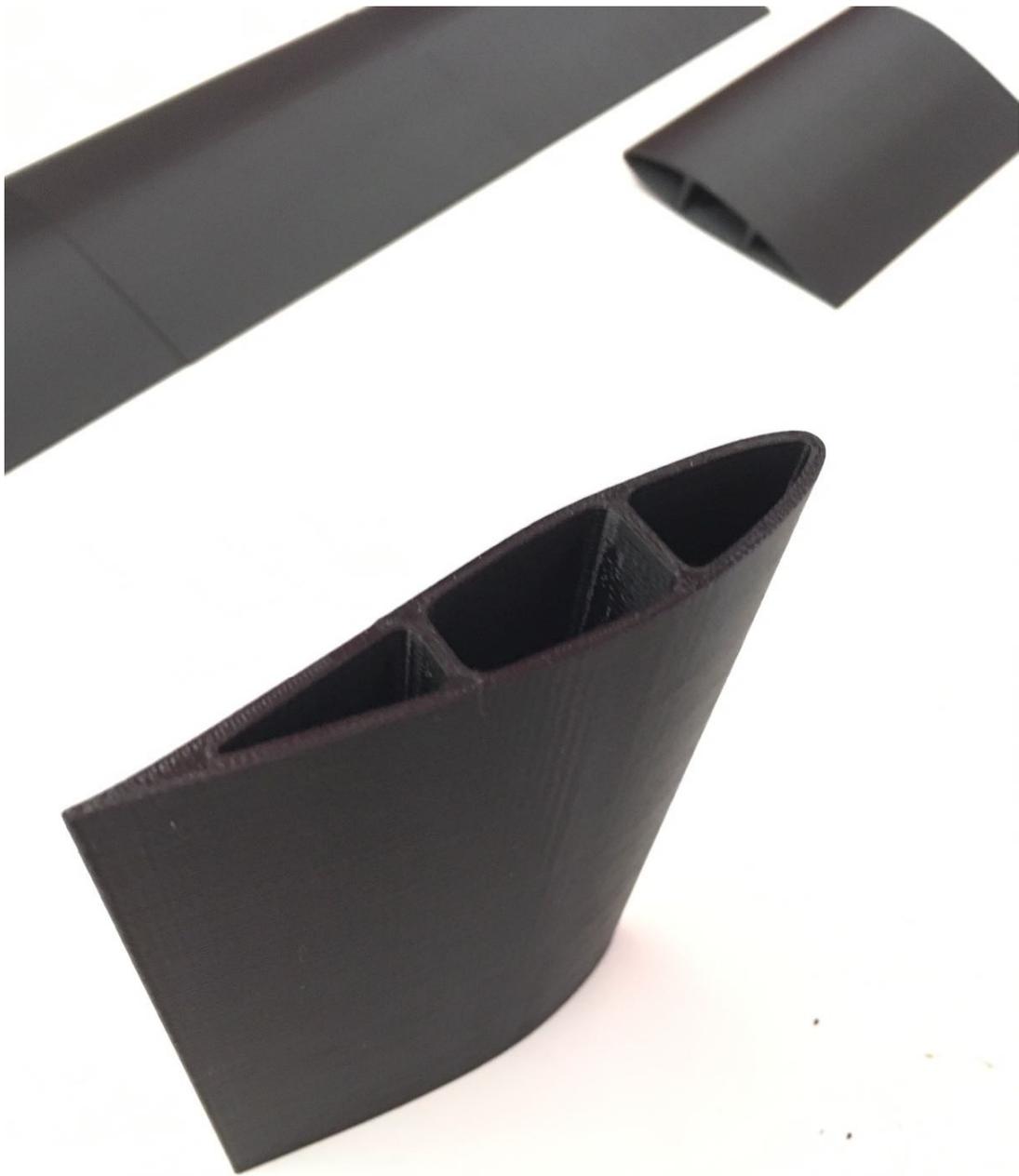


Figura 5.12 - Pale complete, incollate e levigate (non verniciate)

Da un punto di vista meccanico la scelta della fibra di Nylon-Carbon si è rivelata particolarmente vantaggiosa: Il Nylon-Carbon è un materiale di alta qualità, composto da fibre di **nylon e carbonio**. Il nylon conferisce **tenacità** e resistenza al materiale, mentre il carbonio lo rende **leggero e semplice da stampare**. Gli oggetti stampanti si presentano resistenti, di colore **nero opaco**, leggermente ruvidi e con un effetto leggermente metallizzato; il materiale può essere lavorato facilmente una volta terminato il processo di stampa. Il filamento è ottimo per l'**uso**

industriale. Per stampare il Nylon-Carbon non è necessario applicare un fissante speciale, è sufficiente la normale lacca. In fase di slicing si utilizzano i **profili per il PLA**, modificando però la temperatura di estrusione (245°C). Dotato di buona resistenza al calore e alla rottura, può venire utilizzato in **sostituzione dell'ABS**.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche della fibra Nylon-Carbon:

Property	Value	Test Method-ASTM
Density	1,00 g/cm ³	D1505
Melting Point	180 °C	D3418
Flexural Strength	68 Mpa	D790
Tensile Strength	37 Mpa	D638
Degradation Temperature	250 °C	/

Property	Value and Tolerances
Diameter 1,75mm	1,75 ± 0,05mm
Diameter 2,85mm	2,85 ± 0,05mm
Roundness Deviation	Max 3%
Suggested Print Temperature (guideline)	200 °C
Suggested Print Speed	Up to 250mm/s
Suggested Bed Temperature	30-50 °C (not necessary)

Tabella 5.1 - Proprietà fisiche e meccaniche del Nylon-Carbon

5.2.2 La struttura portante

L'intera struttura metallica è stata realizzata e assemblata presso l'officina meccanica Giuseppe Garofalo di Bari. Si è fatto ricorso ad alcune semplificazioni costruttive. Ad esempio i bracci della turbina Darrieus sono stati giuntati al proprio albero tramite saldature., mentre i cuscinetti di supporto della stessa turbina sono stati spostati all'esterno dell'albero per una semplificazione costruttiva oltre che manutentiva.



Figura 5.13 - L'assemblaggio della struttura metallica



Figura 5.14- Il cuscinetto di base

Gli elementi di connessione dei bracci delle pale del modello a resistenza agli assi porta pale, così come le ruote dentate necessarie al sincronismo del moto delle pale, invece, sono stati realizzati per semplicità anch'essi con stampante 3D, sempre in Nylon e Carbon. I bracci sono stati poi fissati al loro interno con semplici viti.



Figura 5.15 - Confronto tra il modello CAD degli elementi di connessione dei bracci delle pale a resistenza ed i componenti realizzati in fibra di Nylon-Carbon tramite stampa 3D



Figura 5.16.a - Fasi di stampa 3D degli elementi di connessione dei bracci delle pale a resistenza



Figura 5.16.b - Fasi di stampa 3D degli elementi di connessione dei bracci delle pale a resistenza

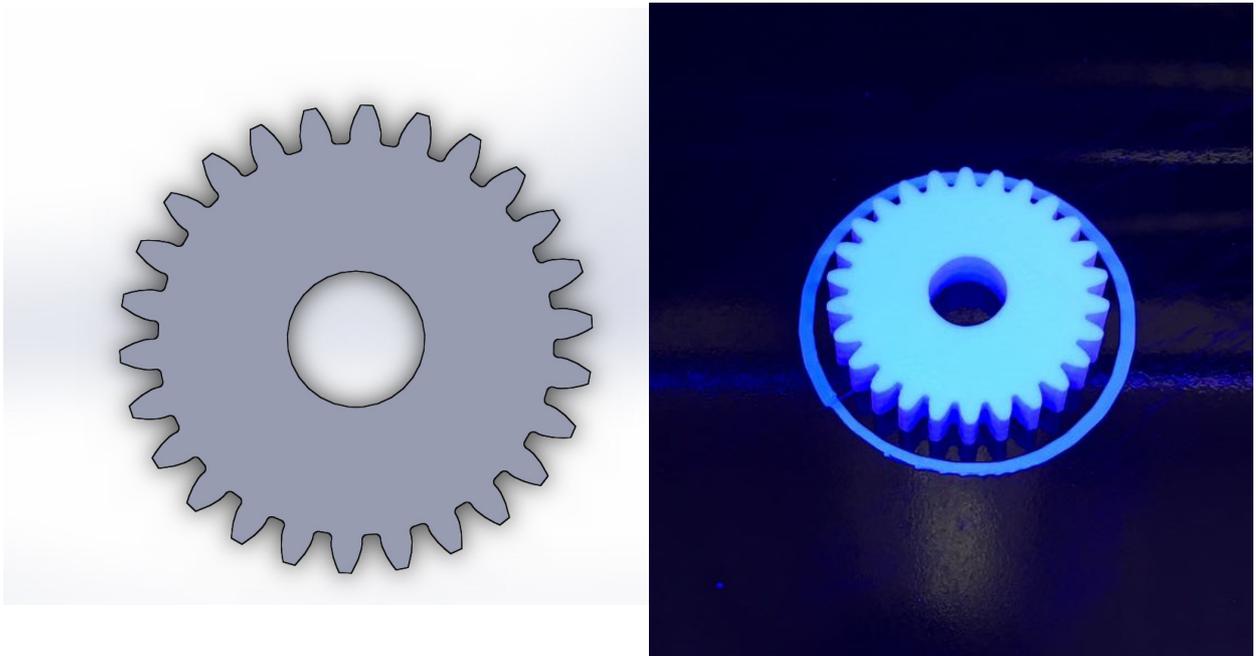


Figura 5.17 - Confronto tra modello CAD delle ruote dentate ed elementi realizzati tramite stampa 3D in fibra di Nylon-Carbon

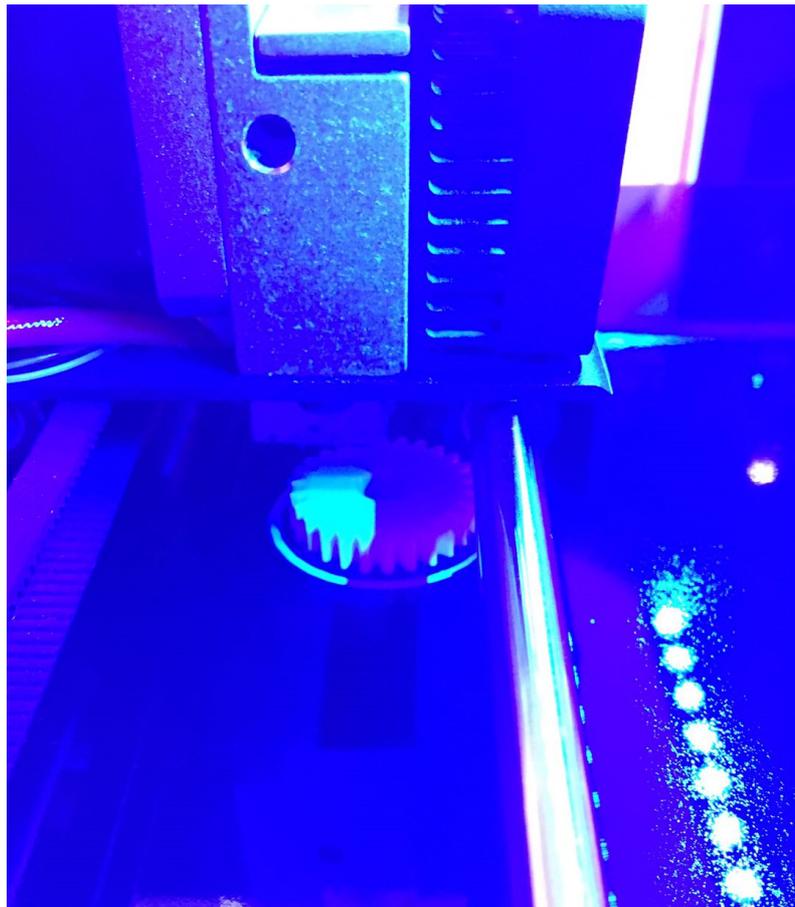


Figura 5.18 - Fasi di stampa 3D delle ruote dentate

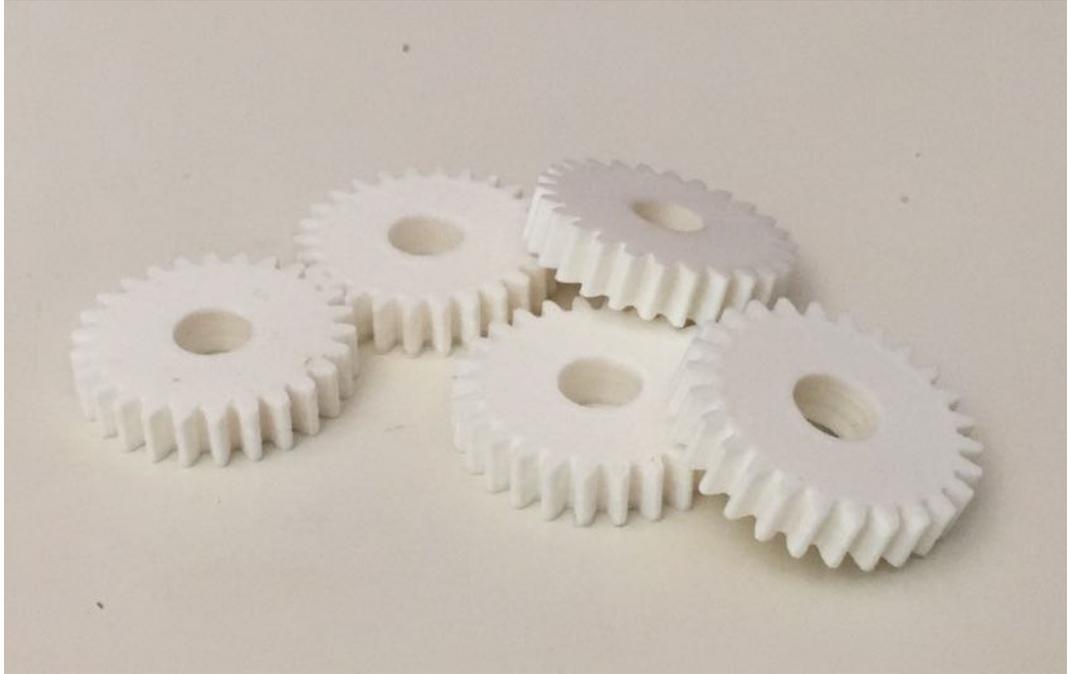


Figura 5.19 - Ruote dentate stampate in 3D in fibra di Nylon-Carbon

5.3.3 Elementi non metallici

La camma, in legno, è stata ottenuta tramite taglio laser. La superficie laterale è stata rivestita da una sottilissima lamina di alluminio, fatta aderire perfettamente al profilo e fissata. In questo modo si riduce di gran lunga l'attrito tra le punte delle aste di comando e la superficie della camma. In fase di ingegnerizzazione del progetto per una eventuale produzione in serie la camma verrà prodotta integralmente in alluminio.

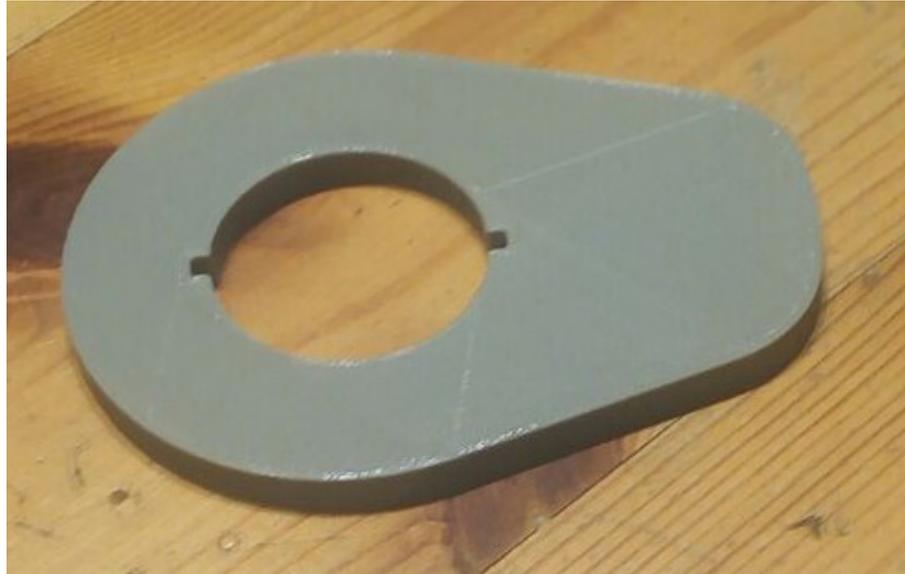


Figura 5.20 - Camma di comando dell'apertura delle pale della turbina Darreius



Figura 5.21 - Montaggio di prova della camma

Per quel che riguarda le punte delle aste di comando, sono state ricavate le sfere dal cuscinetto di una ruota di un pattino e inserite all'interno di un elemento conico con la punta troncata, esattamente come la punta di una penna a sfera. Anche questo elemento è stato ottenuto tramite stampa 3D utilizzando sempre Nylon e Carbon. La sferetta è stata vincolata a restare in sede tramite un piccolo cilindro inserito nella cavità del cono. Il componente è stato poi fissato all'estremità dell'asta di comando.

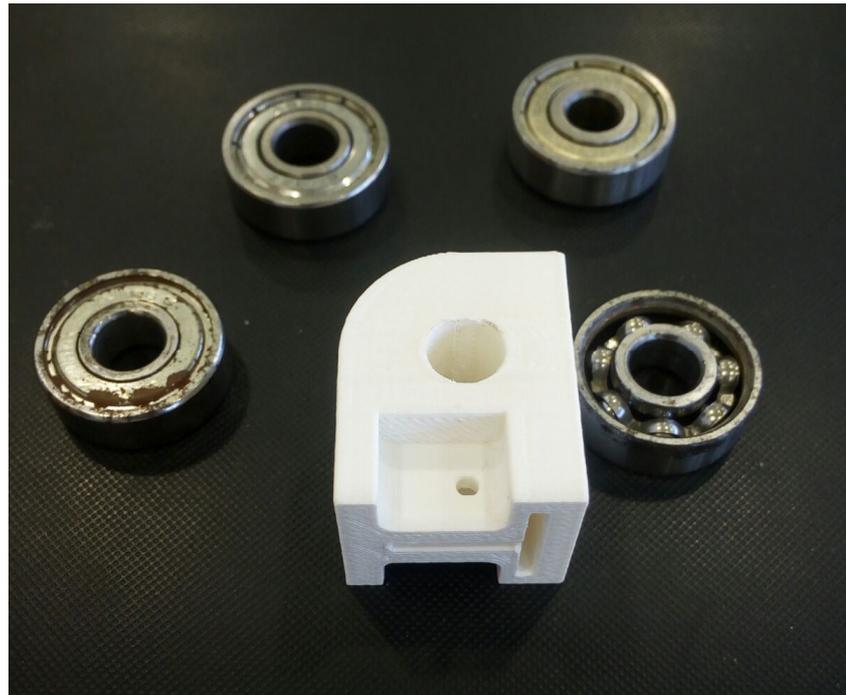


Figura 5.22 - Cuscinetti ed elemento in Nylon-Carbon

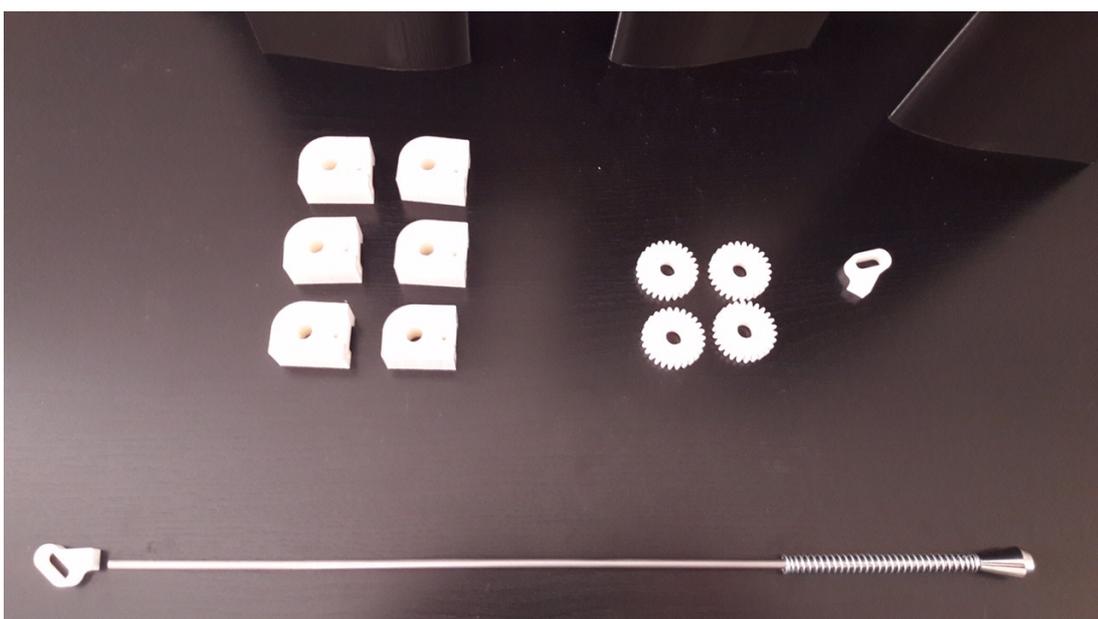


Figura 5.23 - Asta di comando del movimento delle pale con relativa molla

Un ulteriore elemento realizzato con la stampante 3D è l'asola entro cui può ruotare e scorrere il perno mobile della pala, che viene fissato all'altra estremità dell'asta.

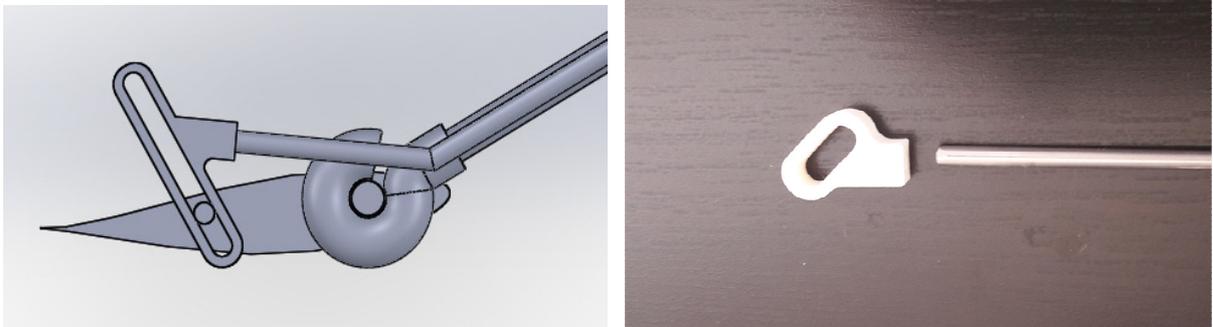


Figura 5.24 - Modello CAD dell'asola e componente realizzato tramite stampa 3D



Figura 5.25 - Asole realizzate in Nylon-Carbon tramite stampa 3D



Figura 5.26 - Pale incollate ed altri componenti rapportati ad un modulo fotovoltaico



Figura 5.27 - Elementi stampati in 3D

Assemblata la struttura, sono state montate le pale. Una volta fissate le pale è stato possibile inserire le aste di comando nelle apposite guide e fissare la molla alla loro estremità.

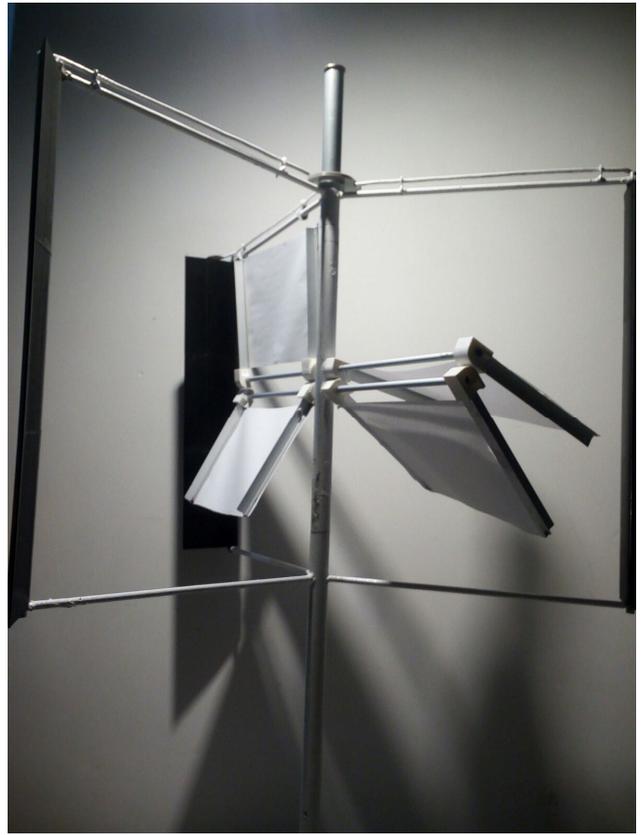
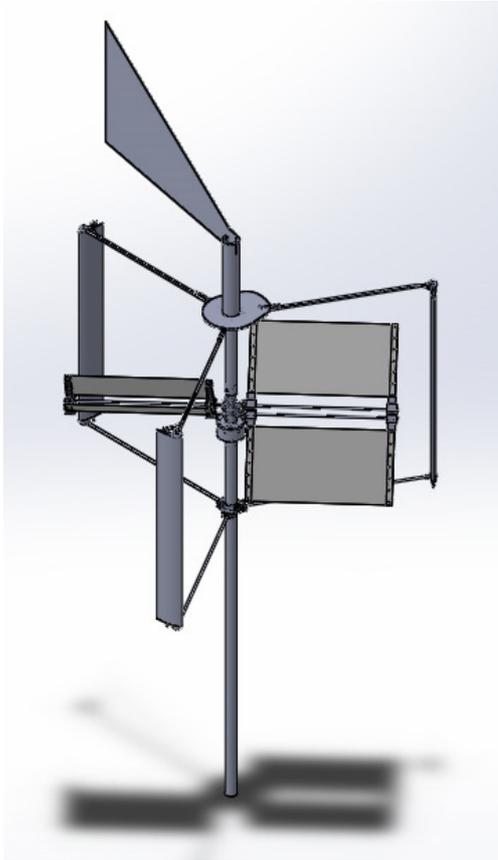


Figura 5.28 - Modello CAD e prototipo assemblato



Figura 5.29 - Prototipo assemblato

Infine si è proceduto con la verniciatura dell'intera struttura, prima con un rivestimento antiossidante, poi con vernice.



Figura 5.30.a - Dettaglio Pale



Figura 5.30.b - Dettaglio Pale

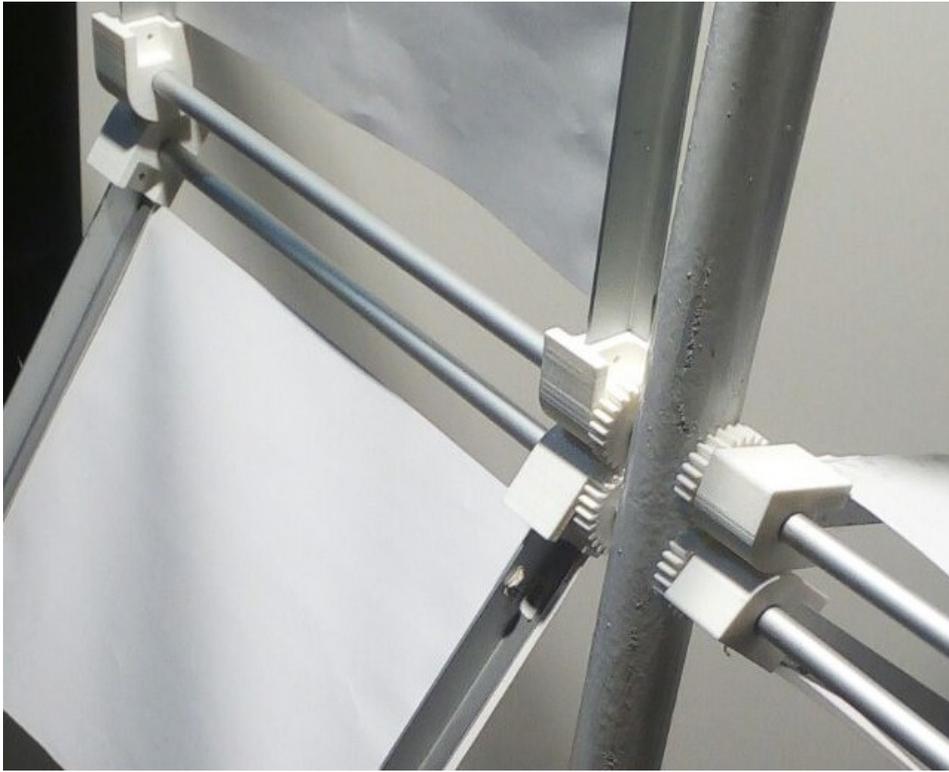


Figura 5.31 - Sistema di movimentazione pale Darreius

CAPITOLO 6

Le conclusioni

6.1 L'analisi dei costi

L'analisi dei costi di produzione è particolarmente importante sia per valutare la commerciabilità del prodotto che per definire le tecnologie di produzione più opportune. La scelta della stampa 3D con Nylon-Carbon, in effetti, si presta particolarmente bene alla realizzazione di prototipi o di piccoli lotti, poiché permette di risparmiare sui costi di realizzazione degli stampi e consente al contempo di modificare in tempo reale la geometria dei componenti. Di contro il costo di stampaggio è attualmente particolarmente elevato e, soprattutto, i lunghi tempi di realizzazione ne sconsigliano l'utilizzo nella produzione in serie. Nelle seguenti tabelle vengono comparati i costi di produzione in funzione del numero di particolari prodotti.

PROTOTIPO			
<i>Elemento</i>	<i>numero</i>	<i>Prezzo unitario</i>	<i>Prezzo totale</i>
Supporto di base	1	300	300
Albero	1	200	200
Supporto telaio	8	10	80
Pale in Nylon-Carbon	3	600	1800
Altri componenti in Nylon-Carbon	a corpo	300	300
Telaio per vele	4	40	160
Vela	4	32	128
Cuscinetti	11	50	550
Generatore elettrico	1	300	300
Inverter	1	500	500
Regolatore di Carica	1	140	140
Componenti elettrici	a corpo	90	90
COSTO TOTALE			4458

Tabella 6.1 - Costi di produzione del prototipo

Produzione in serie: sino a 100 prodotti			
<i>Elemento</i>	<i>numero</i>	<i>Prezzo unitario</i>	<i>Prezzo totale</i>
Supporto di base	1	200	200
Albero	1	130	130
Supporto telaio	8	8	64
Pale in Nylon-Carbon	3	300	900
Altri componenti in Nylon-Carbon	a corpo	150	150
Telaio per vele	4	35	140
Vela	4	28	112
Cuscinetti	11	45	495
Generatore elettrico	1	250	250
Inverter	1	400	400
Regolatore di Carica	1	120	120
Componenti elettrici	a corpo	60	60
COSTO TOTALE			3021

Tabella 6.2 - Costi di produzione (serie fino a 100 pezzi)

Produzione in serie: da 100 a 500 prodotti			
<i>Elemento</i>	<i>numero</i>	<i>Prezzo unitario</i>	<i>Prezzo totale</i>
Supporto di base	1	170	170
Albero	1	110	110
Supporto telaio	8	8	64
Pale in fibra di vetro	3	200	600
Componenti meccanici	a corpo	120	120
Telaio per vele	4	30	120
Vela	4	32	128
Cuscinetti	11	40	440
Generatore elettrico	1	220	220
Inverter	1	250	250
Regolatore di Carica	1	120	120
Componenti elettrici	a corpo	60	60
COSTO TOTALE			2402

Tabella 6.3 - Costi di produzione (serie da 100 a 500 pezzi)

Produzione in serie: da 500 a 1.000 prodotti			
Elemento	numero	Prezzo unitario	Prezzo totale
Supporto di base	1	150	150
Albero	1	100	100
Supporto telaio	8	6	48
Pale in fibra di vetro	3	160	480
Componenti meccanici	a corpo	90	90
Telaio per vele	4	27	108
Vela	4	28	112
Cuscinetti	11	35	385
Generatore elettrico	1	200	200
Inverter	1	230	230
Regolatore di Carica	1	110	110
Componenti elettrici	a corpo	60	60
COSTO TOTALE [€]			1473

Tabella 6.4 - Costi di produzione (serie da 500 a 1.000 pezzi)

E' evidente come la produzione in serie (si è ipotizzata una produzione sino a 1.000 pezzi) consenta di abbattere i costi di realizzazione. L'analisi è mirata essenzialmente a definire la tecnologia produttiva da scegliere e non tiene conto dei costi di progettazione, di ingegnerizzazione, dei costi delle garanzie, etc. Da quanto si evince, sino a 100 pezzi prodotti la soluzione della stampa in 3D continua ad essere conveniente. Oltre quella soglia i costi di realizzazione degli stampi vengono compensati dal minor costo di produzione delle pale in fibra di vetro.

6.1 Le conclusioni

Il prototipo realizzato mira a confermare le ipotesi e la linea progettuale definita in sede teorica. In fase progettuale sono state valutate diverse strade ma alla fine si è scelto di mettere a punto un sistema ibrido a pale mobili capace di sfruttare la turbina Savonius per l'avvio a basse ventosità e la turbina Darreius all'aumentare della velocità del vento. Sulla base delle geometrie scelte si è ritenuto conveniente non realizzare un meccanismo sommatorio degli effetti delle turbine ma un sistema di svincolo automatico della Savonius. In sede di realizzazione del prototipo si sono valutate diverse ipotesi per la costruzione delle pale, alla fine si è optato per la innovativa tecnica dell'additive manufacturing, utilizzando la fibra di Nylon-Carbon per ottenere ottime caratteristiche meccaniche oltre a estrema leggerezza. La scelta della stampa 3D, peraltro, consente di modificare con estrema semplicità i profili dei componenti, permettendo rapide evoluzioni di progetto, cosa che sarebbe stata impossibile utilizzando, ad esempio, stampi per realizzare le pale in fibra di vetro.

Per valutare in concreto il miglioramento di performance della turbina così costituita è opportuno mettere a punto una campagna di test sperimentali da realizzarsi in galleria del vento. Per una valutazione complessiva circa la reale commerciabilità è di estrema importanza valutare in via sperimentale l'incremento di performance della turbina, a fronte della maggiore complessità costruttiva e dei conseguenti maggiori rischi di guasto. Nello specifico, è di grande importanza approfondire le analisi dei costi di realizzazione dei componenti stampati in 3D confrontandoli con quelli relativi a metodologie più classiche, in modo da orientare le scelte progettuali verso l'una o l'altra soluzione in funzione delle quantità previste.

6.2 Gli sviluppi futuri

La turbina ibrida a pale mobili oggetto del presente lavoro è stata concepita secondo il principio dell'adattamento geometrico in funzione della rotazione intorno all'asse verticale. Un interessante variante può

essere rappresentata dalla possibilità di variare il profilo della pala non già in funzione dell'angolo di rotazione intorno alla verticale ma in funzione della velocità del vento. In particolare si è ipotizzato di modificare in modo meccanico l'intradosso della pala: in figura 6.1 è riportata una rappresentazione di 3 delle tante configurazioni possibili che il profilo può assumere:

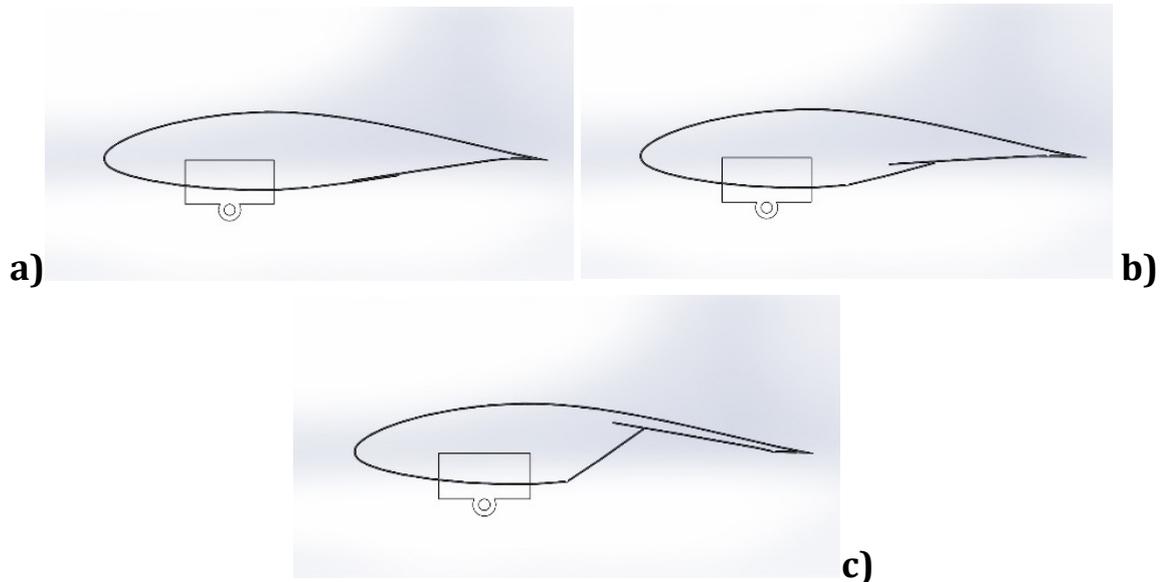


Figura 6.1 - Configurazioni possibili del profilo palare variabile. In a) il profilo base NACA 64(3)418. In c) l'esaltazione della caratteristica di variabilità del profilo

Gli studi sono stati condotti per stabilire la geometria migliore che consente di ottenere una portanza maggiore per bassi valori di velocità del vento rispetto a quella che si otterrebbe col NACA 64(3)418. La creazione del profilo per le basse velocità viene effettuata per tentativi partendo però da considerazioni di tipo pratico: viene accentuata la curvatura nella parte inferiore posteriore per ottenere un rallentamento maggiore del flusso in quella zona con conseguente aumento di pressione. Successivamente con simulazioni di tipo statico sono state valutate le prestazioni. In figura 45 sono riportati i risultati ottenuti da un primo studio sul profilo base NACA 64(3)418, simulando un vento di velocità 2 m/s con un angolo di incidenza di 10°. In figura 6.2 invece sono riportati i risultati relativi a una possibile configurazione variata del profilo NACA scelto nelle stesse condizioni di flusso.

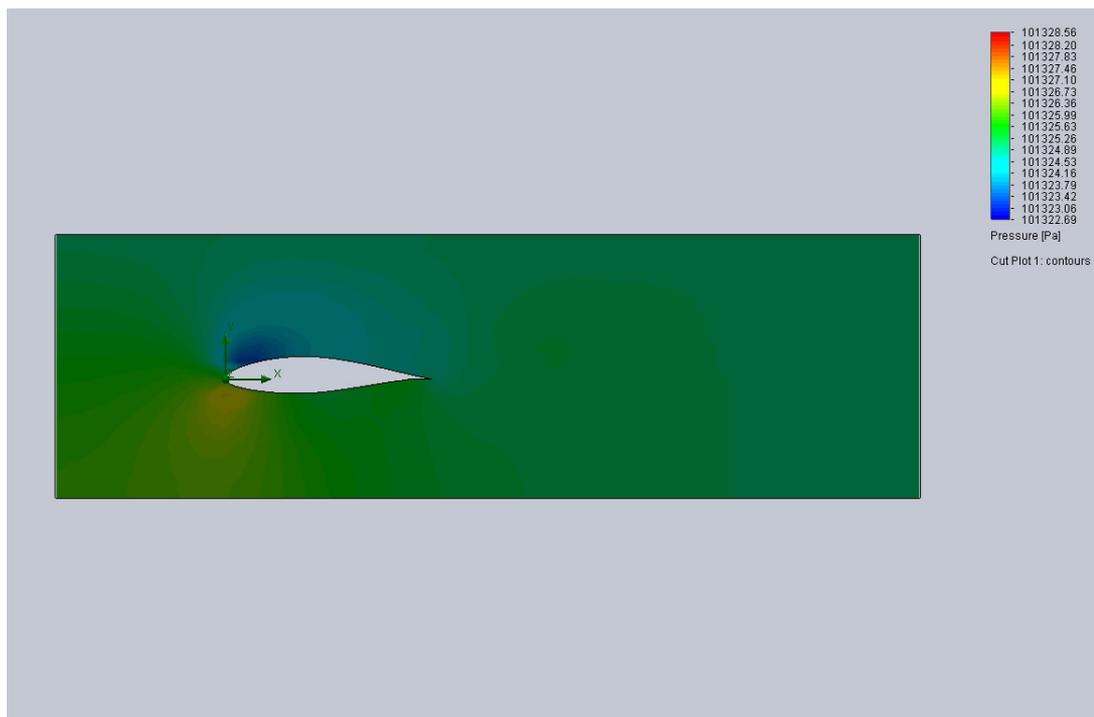


Figura 6.2 - Grafico della distribuzione delle pressioni ottenute con un profilo NACA 64(3)418 con un angolo di incidenza del flusso di 10° a 2m/s

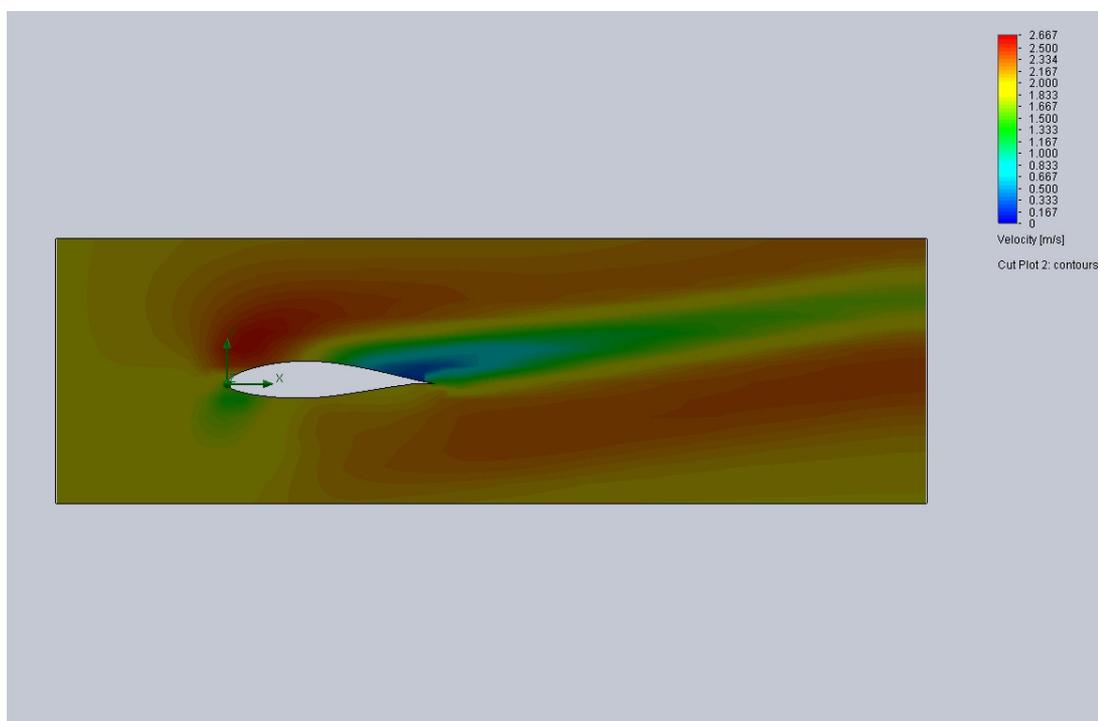


Figura 6.3 - Grafico della velocità ottenuta con un profilo NACA 64(3)418 con un angolo di incidenza del flusso di 10° a velocità 2m/s

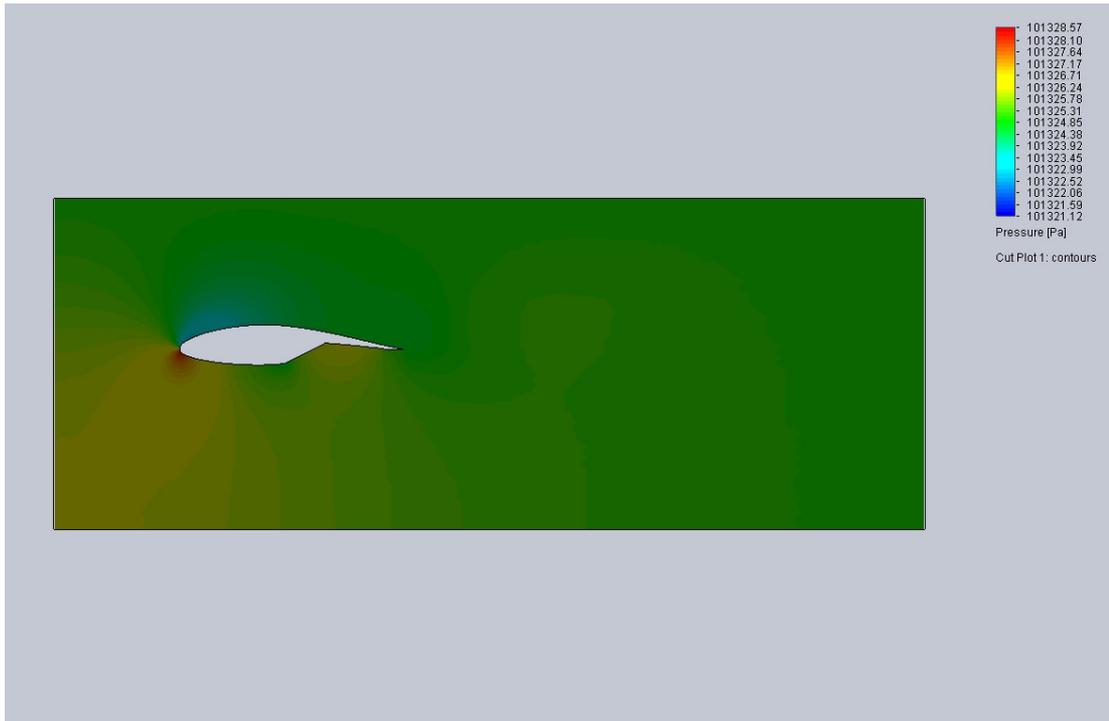


Figura 6.4 - Grafico della distribuzione delle pressioni ottenute con la versione modificata del profilo NACA64(3)418 con un angolo di incidenza di 10° e velocità 2 m/s

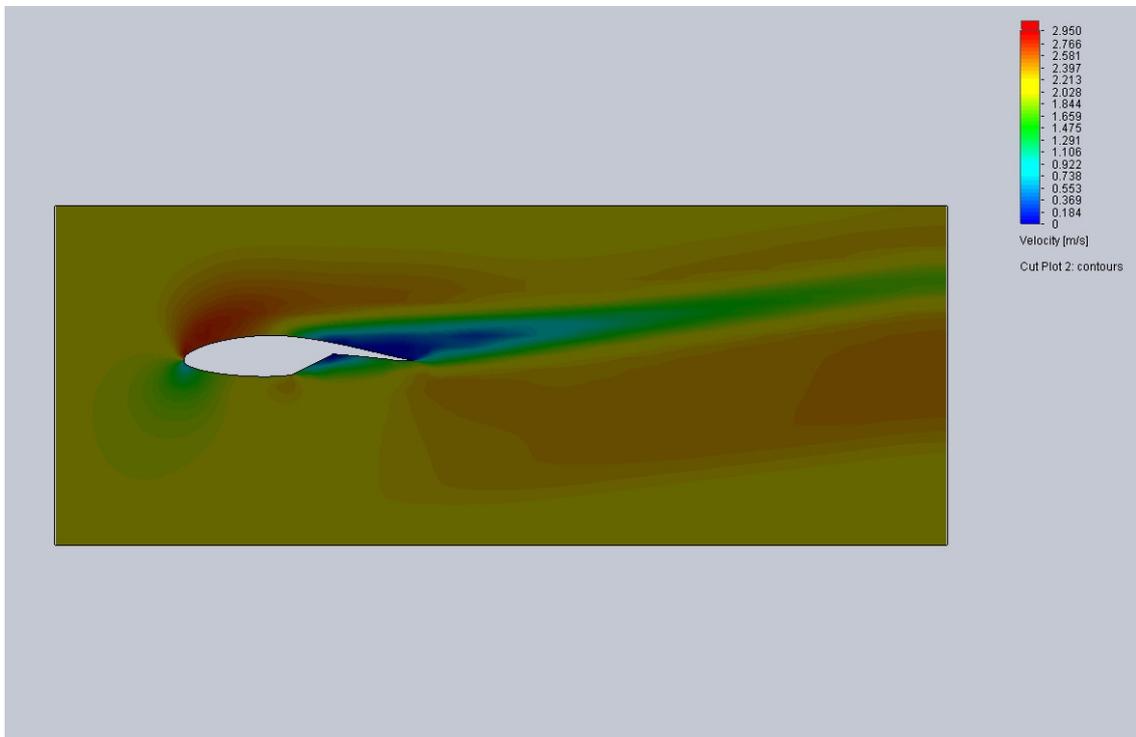


Figura 6.5 - Grafico della velocità ottenuta con la versione modificata del profilo NACA64(3)418 con un angolo di incidenza di 10° e velocità 2 m/s

Dall'analisi è risultato che nel caso del profilo modificato si ottiene una spinta in verso opposto a quello della componente orizzontale del vento circa 3 volte superiore a quella ottenuta col profilo NACA.

Stabilito il profilo ottimale si potrebbe procedere con un confronto delle curve di potenza in funzione del vento, tra il profilo NACA scelto e la sua configurazione variata.

L'idea che si vuole verificare è l'esistenza un punto di intersezione tra le due curve al quale corrisponde un valore di velocità del vento, V_c , superato il quale è opportuno cambiare la configurazione del profilo, passando a quello base (il NACA 64(3)418), il quale fornirebbe una potenza maggiore per velocità del vento superiori.

Per approfondire gli studi sui profili si è utilizzato un software specifico, abbastanza accreditato, per gli studi sui profili per applicazioni aeronautiche: Xfoil, col limite di non poter ottenere direttamente i risultati degli effetti del flusso per un angolo giro completo, ma solo in un intervallo di angoli.

Inizialmente si è preso come riferimento il profilo NACA64(3)418 e se ne sono studiate le prestazioni utilizzando due diversi valori di Re . Il primo corrispondente al caso di turbina ferma con vento a 2m/s. Il secondo di un ordine di grandezza più elevato. In entrambi i casi l'analisi è stata effettuata in un range di angoli tra -5 e 25 gradi. Successivamente, con le stesse modalità, sono stati analizzati diversi profili simili a quello di riferimento ma con la parte posteriore dell'intradosso molto più incavata. I risultati ottenuti sono stati sempre gli stessi: per bassi valori di Re , il rapporto L/D è risultato superiore per i profili modificati. Al contrario, per alti Re si è sempre verificato che il suddetto rapporto è maggiore per il NACA. Ciò verifica le ipotesi di partenza secondo le quali una maggiore concavità nella parte posteriore dell'estradosso avrebbe prodotto un rallentamento del flusso in quella regione con incremento della portanza. Con l'aumentare del Re , invece, le perdite avrebbero assunto un peso sempre maggiore rispetto al NACA 64(3)418. Certamente è possibile effettuare ulteriori studi in futuro per l'ottimizzazione dei profili, che comunque dovranno esser conciliabili con le difficoltà costruttive del caso reale.

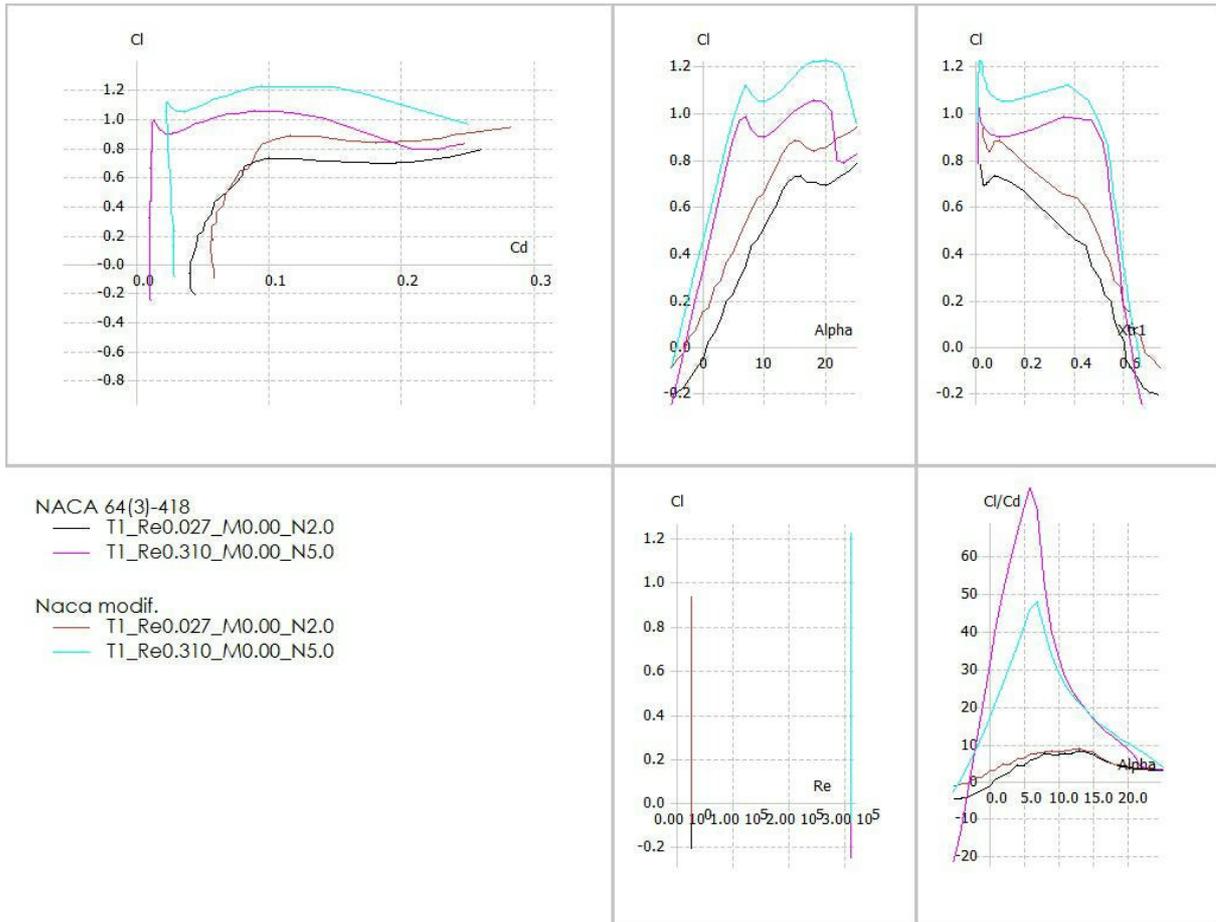


Figura 6.6 – Grafico della velocità ottenuta con la versione modificata del profilo NACA64(3)418 con un angolo

Si è ipotizzata una possibile soluzione meccanica al problema della modifica della forma dell'intradosso della pala: la parte posteriore del profilo è costituita da due pannelli che si sviluppano per quasi tutta la lunghezza della pala, capaci di ruotare ciascuno attorno al proprio asse verticale. Parti essenziali della pala sono l'"elemento di collegamento" tra i due pannelli, rappresentato in figura 6.7 e le cerniere che ne consentono la rotazione.

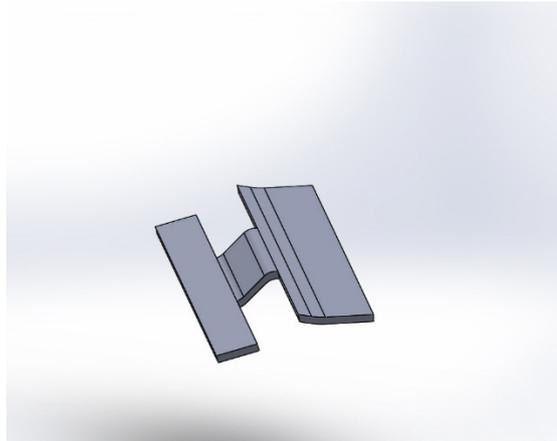


Figura 6.7 - Elemento di collegamento tra i pannelli mobili della pala

L'elemento di collegamento pannelli è costituito da un lamierino d'acciaio, il quale viene curvato in più punti fino ad ottenere una geometria piuttosto complessa. Viene fissato tramite un'estremità nella parte interna del pannello più esterno (figura 6.8). L'altra estremità ha un profilo che approssima la traiettoria del punto di contatto tra i due pannelli (figura 6.9) e deve mantenere il contatto con la parte interna dell'altro pannello. La sua funzione è quella di consentire il moto simultaneo dei pannelli assicurando un contatto continuo tra i due, anche durante il moto attorno alle rispettive cerniere.

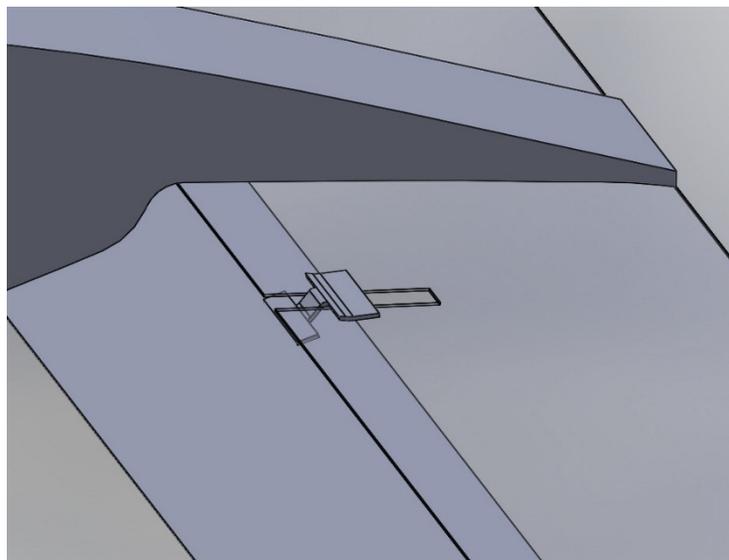


Figura 6.8 - Elemento di collegamento montato

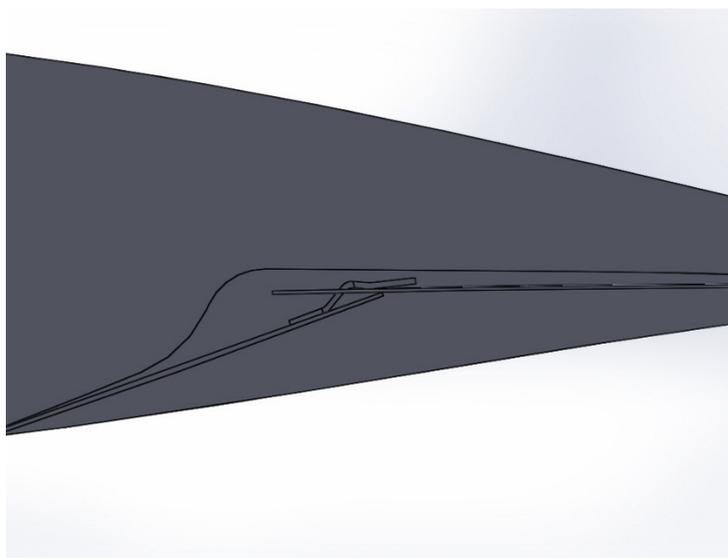


Figura 6.9 - Profilo dell'elemento di collegamento montato

Tale soluzione necessita di notevoli sviluppi ma potrebbe costituire un interessante integrazione al lavoro svolto.

Riferimenti bibliografici

- A. Pantano. "HIGH-EFFICIENCY OSCILLATING-BLADE WIND TURBINE". Brevetto N. WO2012041961.
- ABB: Quaderni di applicazione tecnica n.13.
- Mario Alejandro Rosato, "Progettazione di microturbine eoliche", 2015
- Tesi di laurea, F. Farina.
- Tesi di dottorato F. Mungiovino, "Sviluppo di una innovativa turbina eolica urbana"
- M. Torresi, S. M. Camporeale, G. Pascazio, B. Fortunato, "Performance analysis of a Darrieus wind turbine", 2008.
- U.K. Saha, S. Thotla, D. Maity, "Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments", 2008
- P. Cooper, O. Kennedy, "Development and analysis of a novel vertical axis wind turbine", 2005.
- Robert Howell, Ning Qin, Jonathan Edwards, Naveed Durrani, "Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine", 2010
- Simão Ferreira, C., van Bussel, G. e van Kuik, G., «2D PIV visualization of dynamic stall on a vertical axis wind turbine», in «45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit / ASME Wind Energy Symposium», 2007
- Simão Ferreira, C., Bijl, H., van Bussel, G. e van Kuik, G., «Simulating Dynamic Stall in a 2D VAWT: Modeling strategy, verification and validation with Particle Image Velocimetry data», in «Journal of Physics», No. 012023 in 75, IOP Publishing, 2007
- Simão Ferreira, C., van Kuik, G., van Bussel, G. e Scarano, F., «Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine», Experiments in Fluids, 2008
- Squires, K. D., Forsythe, J. R., Strang, W. Z., Wurtsler, K. E., Tomaro, R., Grismer, M. J. e Spalart, P., «Progress on detached-eddy simulation of massively separated flows», AIAA, vol. 1021, 2002
- Strickland, J., «The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Streamtube», Rap. Tecn. SAND75-0431, Sandia Laboratories, 1975
- Wakui, T., Tanzawa, Y., Hashizume, T. e Nagao, T., «Hybrid Configuration of Darrieus and Savonius Rotors for Stand-Alone Wind Turbine-Generator Systems», Electrical Engineering in Japan, vol. 150 (4), 2005

- Di Paolo, R., Analisi CFD di una turbina eolica ad asse verticale, Tesi di laurea, Università di Roma La Sapienza, 2007
- Cetraro, G., Analisi numerica di una turbina eolica ad asse verticale, Tesi di laurea, Università di Roma La Sapienza, 2009
- Fujisawa, N. e Shibuya, S., «Observations of dynamic stall on darrieus wind turbine blades», Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 89, 2001
- Jacobs, E. e Sherman, A., «Airfoil characteristics as affected by variations of the reynolds number», Rap. tecn., NACA, 1937
- Mertens, S., van Kuik, G. e van Bussel, G., «Performance of a H-Darrieus in the Skewed Flow on a Roof», Journal of Solar Energy Engineering, vol. 125, 2003