

**SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA  
CON SEDE A CESENA**

*CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA  
IN INGEGNERIA MECCANICA*

*TESI DI LAUREA*

In

*DISEGNO TECNICO INDUSTRIALE*

***OTTIMIZZAZIONE COSTRUTTIVA E DI MONTAGGIO DI  
UN AEROGENERATORE AD ASSE VERTICALE  
PRIVO DI FONDAZIONE***

**CANDIDATO**

Gianluca Bonavita

**RELATORE**

Chiar.mo Prof. Ing. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2010/11

Sessione III

# PREMESSA

Uno dei problemi degli impianti eolici per la produzione di energia elettrica sono i costi di installazione iniziali che per una realizzazione tradizionale ammontano a circa un quarto della spesa totale, infatti comprendono la realizzazione delle fondamenta e il trasporto delle varie parti che costituiscono la macchina. Spesso accade anche che esistano zone molto favorevoli per l'installazione di impianti eolici, ma che non possono essere sfruttate a causa della mancanza di adeguate vie di accesso (Fig.1), costringendo alla realizzazione di apposite strade, motivo che frequentemente fa decadere la convenienza dell'investimento stesso.



*Fig.1: Lavori ausiliari relativi ad una centrale eolica in zona montuosa in Abruzzo*

Obiettivo di questa tesi quindi è stato quello di progettare e disegnare (con l'ausilio del programma CAD "Solid works 2011") un aerogeneratore ad asse verticale di tipo Darrieus, pensato per essere posizionato in zone montuose soggette a forti venti che spesso non sono raggiungibili con mezzi pesanti, così la condizione di un facile trasporto è stato uno dei punti chiave in fase di progettazione.

Per soddisfare le specifiche appena enunciate, la struttura dell'aerogeneratore è stata pensata come frutto dell'assemblaggio di tanti componenti di dimensioni limitate (massimo 3 metri), poi si è cercato di adottare collegamenti semplici, per lo più flange bullonate, evitando così saldature e giunzioni sul posto che richiedano specifiche competenze o utensili particolari. Ogni fase del progetto è stata ispirata dall'obiettivo di ottenere una turbina eolica caratterizzata da un'elevata semplicità costruttiva, motivo per cui si è deciso di realizzarla senza la torre di sostegno centrale, utilizzando una tipologia costruttiva innovativa e molto snella in relazione alle dimensioni totali in ballo.

E' stato poi analizzato il problema del destino dei basamenti delle torri eoliche al termine della vita utile degli impianti, che in genere è valutata in circa 25 anni. Si pensi che il basamento di una torre eolica di 1 MW di potenza è costituito da un manufatto di cemento armato che ha approssimativamente una sezione orizzontale di 5×5 m ed una profondità che varia da 20 a 30 m. In genere questo comporta l'impiego di una quantità di cemento armato che può variare da 500 a 1.000 tonnellate. E' facile intuire che la creazione e il posizionamento di un basamento di tali dimensioni richiedano un ingente investimento e lavori di impatto non trascurabile (Fig. 2, Fig. 3), ma anche che al termine della vita utile dell'impianto il ripristino delle condizioni iniziali risulta spesso poco agevole e molto dispendioso infatti, tale operazione, ha un costo medio dell'ordine del centinaio di euro per metro lineare di struttura smantellata, il costo complessivo per lo smantellamento ammonta quindi a diverse centinaia di migliaia di euro, tenendo anche conto di tutti i costi relativi al trasporto ed allo smaltimento dei materiali.

Alcune volte addirittura, l'unica soluzione percorribile, che sicuramente risulta molto più economica ma grave dal punto di vista dell'impatto ambientale, consiste nel rimuovere semplicemente le parti affioranti nel terreno e nel sotterrare il basamento con pochi centimetri di terra, che così rimane dov'è.

E' anche per questi motivi che la turbina oggetto dell'analisi è stata studiata per :

- non richiedere scavi e di lavori di grossa entità, infatti la struttura è stata molto alleggerita rispetto alle soluzioni di pari dimensioni attualmente in circolazione, con la rimozione del palo centrale di sostegno come già enunciato;
- non richiedere la realizzazione delle fondamenta, con conseguente costruzione del basamento in cemento armato.

In questo modo a fine vita dell'impianto l'impatto ambientale risulta pressoché nullo.

Infine si è cercato di ovviare il problema dell'avviamento che costituisce il principale "tallone d'Achille" delle turbine ad asse verticale ed in particolar modo per le turbine Darrieus con opportuni sistemi di apertura delle pale.

Si è imposto che come specifiche di progetto che l'aerogeneratore deve erogare una potenza di 100 kW, considerando una velocità media del vento pari a 16 m/sec .



*Fig. 2: Scavo per basamento di una centrale eolica*



*Fig.3: Altro scavo per basamento di una centrale eolica.*







# CAPITOLO 1

## LE FONTI ENERGETICHE

### 1.1 INTRODUZIONE

Una fonte energetica è una qualsiasi risorsa in grado di fornire una quantità di energia maggiore di quanta ne occorra per il suo approvvigionamento o estrazione, considerando anche i trattamenti eventualmente necessari per consentirne l' utilizzo. Le fonti energetiche subiscono criteri molto diversi di classificazione, il più importante è quello che le distingue in fonti energetiche primarie e secondarie.

Una fonte di energia si definisce primaria se è prodotta direttamente dalla natura e può essere sfruttata senza dover subire alcuna trasformazione. Rientrano in questa classificazione (Fig.1.1.1) sia fonti rinnovabili (quali ad esempio l'energia solare, eolica, idroelettrica, geotermica, l'energia delle biomasse) che fonti esauribili, come i combustibili direttamente utilizzabili (petrolio grezzo, gas naturale, carbone) o l'energia nucleare.

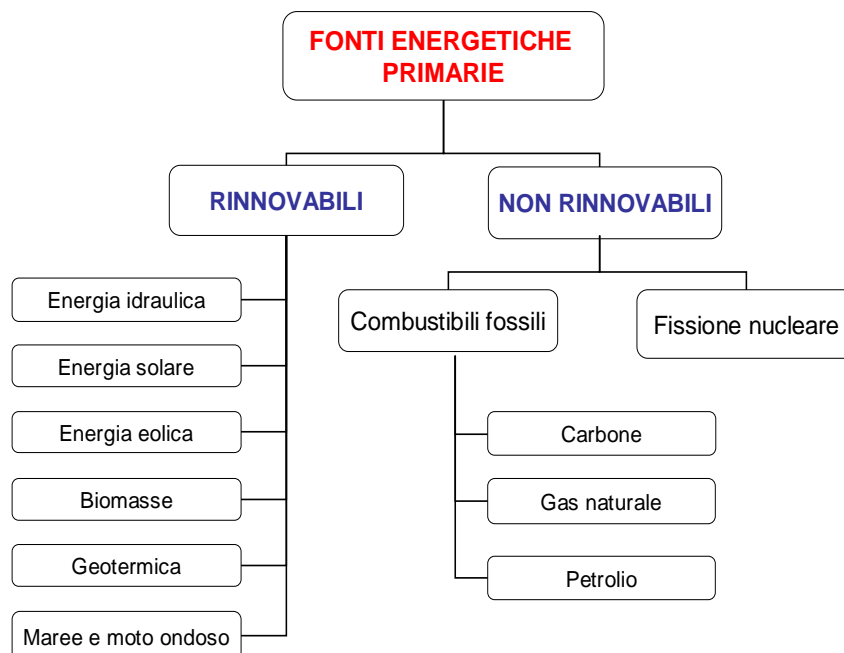


Fig.1.1.1: Classificazione delle fonti energetiche primarie

## CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE

Perché una fonte primaria possa essere sfruttata deve avere alcune caratteristiche, ad esempio deve essere:

- Concentrabile: sta a significare che deve essere possibile concentrare la sorgente di energia entro un'area relativamente limitata, affinché sia possibile controllarla come ad esempio una centrale elettrica, un serbatoio di benzina di un'automobile o addirittura la batteria a bottone per l'alimentazione di un orologio al quarzo.
- Indirizzabile: cioè che deve essere possibile indirizzare il prodotto ad esempio benzina, acqua o raggi solari nella direzione in cui esso deve essere utilizzato, come un bruciatore, una turbina, una lente o uno specchio.
- Frazionabile: deve essere possibile frazionare la fonte in più parti, in modo da poter utilizzare solamente la parte, piccola o grande che sia, che ci serve in quel momento. Per esempio, l'energia di un fluido che sia benzina, gasolio o gas è frazionabile a piacere.
- Continua: deve poter funzionare per un certo tempo, fornendo la sua energia senza interruzioni e senza che si esaurisca in pochi secondi.
- Regolabile: è quell'energia fornita dalla sorgente in modo graduabile a secondo le necessità.

L'attuale sistema energetico mondiale (Fig.1.1.2) è essenzialmente basato sulle fonti primarie di origine fossile costituite da riserve di combustibili naturali, che si sono formate nel corso dell'evoluzione del nostro pianeta e si sono conservate nelle profondità della crosta terrestre. Vengono bruciate per soddisfare circa l' 83% dell'attuale fabbisogno energetico globale e sono costituite essenzialmente da petrolio, carbone e gas naturale (metano). Un altro 7% circa del fabbisogno energetico globale è coperto da materiale fissile, essenzialmente uranio 235 ricavato dall'uranio naturale, utilizzato in centrali nucleari. Quindi circa il 90% del fabbisogno energetico globale è coperto da fonti primarie non rinnovabili, poco più del 10% da fonti rinnovabili e biomasse, il 2,2% da energia idroelettrica.

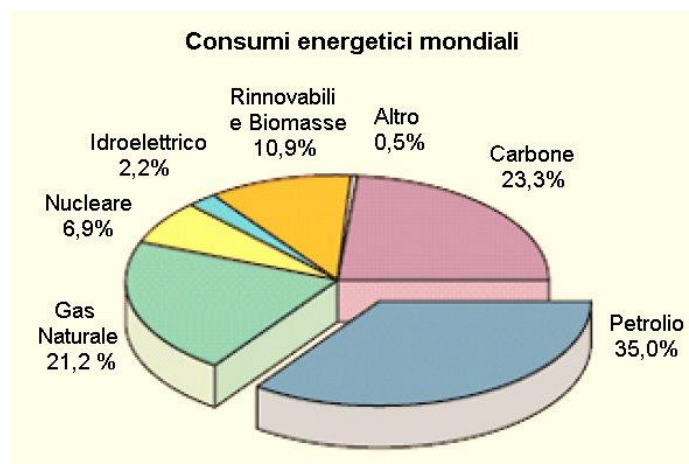


Fig.1.1.2: Consumi energetici mondiali



Le fonti di energia secondaria invece sono quelle sorgenti che possono essere utilizzate solo a valle di una trasformazione di energia mediante processi chimici o fisici, perciò una fonte energetica secondaria è una fonte energetica non direttamente disponibile in natura, ma che può essere prodotta partendo da una fonte di energia primaria, utilizzando tecnologie che possono differenziare molto l'una dall'altra. Si hanno processi molto diversi per la produzione di energia elettrica, energia termica e carburanti:

- Per la produzione di energia elettrica le tecnologie più utilizzate sono sistemi termoelettrici in cui l'energia primaria viene trasformata in calore per azionare turbine a gas e/o a vapore. Il rendimento di questi sistemi va dal 25% per piccoli impianti che utilizzano combustibili grezzi al 55% di grandi impianti turbogas a ciclo combinato.
- Per la produzione di calore si utilizzano svariate tecnologie in funzione alle diverse esigenze (riscaldamento o refrigerazione) e alle diverse temperature (poche decine di gradi Celsius per il riscaldamento fino a migliaia di gradi per gli altiforni industriali). Normalmente per il riscaldamento si utilizzano combustibili quali il metano di rete (derivato da un minimo trattamento del gas naturale), il gasolio, gpl e similari derivati dal petrolio e ormai raramente dal carbone (derivato da antraciti e litantraci, carboni grezzi), per gli altiforni si utilizza generalmente il carboncoke, ricavato dal carbone o dal petrolio.
- Per ottenere carburanti per autotrazione il petrolio viene trattato in raffinerie, da queste si ottengono benzine, gasoli, oli combustibili, gpl e gas leggeri. Dal gas naturale si ottiene il metano.

Un' ulteriore classificazione prevede la distinzione delle fonti energetiche in riserve e risorse. Con riserva si definisce la quantità sfruttabile di una risorsa naturale, accertata mediante valutazioni e studi, che può essere utilizzata a fini economici dall'uomo. Per risorsa invece si intende ogni materia fisica non prodotta dall'uomo ed in grado di generare un'utilità economica. Solo una parte delle risorse naturali disponibili, perciò, viene definita come riserva.

Per ultimo ma non meno importante è il tipo di classificazione, che divide le fonti energetiche in due grandi famiglie:

- Fonti energetiche non rinnovabili
- Fonti energetiche rinnovabili

Il parametro fondamentale per tale suddivisione è il tempo di rigenerazione della fonte di energia: se tale grandezza è paragonabile al tempo di sfruttamento della risorsa si parla di fonti rinnovabili, in caso contrario, ovvero tempo di rigenerazione diversi ordini di grandezza superiore rispetto a quello di sfruttamento, si parla di fonti non rinnovabili.

## ***1.2 FONTI NON RINNOVABILI***

Le fonti di energie non rinnovabili sono quelle fonti che derivano da risorse che tendono ad esaurirsi sulla scala dei tempi umani, diventando troppo costose o troppo inquinanti per l'ambiente, al contrario di quelle rinnovabili, che vengono reintegrate naturalmente in un periodo di tempo relativamente breve. Le fonti non rinnovabili sono oggi quelle più sfruttate dall'umanità (come già citato da sole forniscono oltre l'80% del fabbisogno energetico mondiale) perché sono in grado di produrre le maggiori quantità di energia con impianti tecnologicamente semplici e collaudati, che però hanno sempre portato con sé problemi di inquinamento ambientale quali la produzione di gas serra o addirittura in taluni casi la produzione di scorie radioattive.

Come è noto risultano concentrate in poche aree del mondo ed il loro controllo è spesso causa di attriti, se non di veri e propri conflitti sul panorama internazionale.

Sono costituite principalmente dalle fonti di origine fossile ovvero da sostanze che si sono formate, nel corso di centinaia di milioni di anni, dall'accumulo sottoterra o sul fondo del mare di materia organica vegetale e animale sottratta al ciclo naturale della decomposizione per cause fortuite. Solo una piccolissima frazione della materia vivente finisce con il fossilizzarsi nel ventre della terra. Per questi motivi la disponibilità delle fonti fossili non è infinita.

Queste sostanze sono formate principalmente da carbonio ed idrogeno in quantità diverse. Bruciando danno quindi luogo alla formazione di anidride carbonica ed acqua rispettivamente, oltre che ad un'immensa varietà di sostanze inquinanti.

Nello specifico sono fonti di energia non rinnovabile molto utilizzate: il carbone, il petrolio, il metano e i minerali usati per la produzione di energia nucleare, quali l'uranio ed il plutonio.

### ***1.2.1 IL CARBONE***

I carboni sono delle vere e proprie rocce sedimentarie e sono costituiti dai resti di accumuli vegetali, modificati dalle pressioni e temperature che si trovano in profondità nella crosta terrestre, attraverso una progressiva eliminazione, dai resti vegetali, di componenti come idrogeno e ossigeno con un conseguente arricchimento indiretto di carbonio che lo portano a diverse litologie a seconda della percentuale di carbonio presente.

Il processo che porta dalla pianta vegetale alla formazione di carbone è naturalmente lunghissimo (Fig. 1.2.1) e può richiedere diversi milioni di anni, se non centinaia di milioni per la sua attuazione.

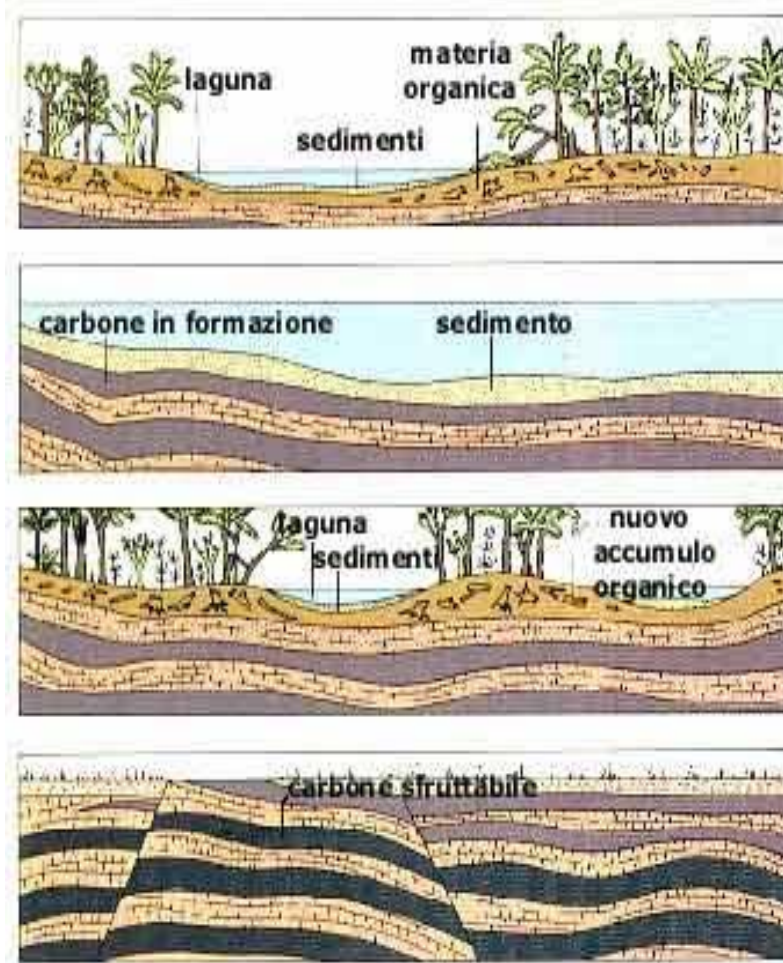


Fig. 1.2.1 : Fasi della formazione del carbone: nella prima immagine si accumulano i resti, poi vengono ricoperti dai sedimenti portati dall'innalzamento marino; successivamente il mare si ritira e ricomincia il ciclo fino a quando non si completa la maturazione nel corso di milioni di anni

Nel caso che movimenti tettonici riportino il materiale in superficie il processo di maturazione del carbone si arresta immediatamente e il materiale inizia a degradarsi. Questo rappresenta infatti un problema nelle cave a cielo aperto (Fig. 1.2.2) o in miniere a bassa profondità.



Fig1.2.2: Miniera a cielo aperto di carbone

## *CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE*

Il carbone fossile è noto come fonte energetica fino dall'antichità, come è accaduto per il petrolio, ma è solo dal 1700 che è divenuto una fonte primaria di energia, sostituendo il legno soprattutto in Gran Bretagna con la famosa Rivoluzione Industriale, infatti fu l'invenzione della macchina a vapore che, creando una enorme richiesta di combustibile, diede impulso all'industria carbonifera. Il ritmo della produzione mondiale crebbe da circa 20 milioni di tonnellate annue nel 1800, a 100 milioni nel 1850, a 700 milioni nel 1900, per giungere a un massimo di 1260 milioni nel 1913 e, dopo la parentesi della Prima guerra mondiale, di 1400 milioni nel 1929. Dopo di allora, però, sia i perfezionamenti introdotti nei generatori di vapore e nei forni metallurgici per abbassare il consumo specifico, sia la diffusione della elettrificazione e della trazione ferroviaria con motori a combustione interna provocarono una diminuzione del consumo con una flessione massima fino a 960 milioni di tonnellate nel 1932. Da quell'anno la produzione tornò lentamente a salire, riportandosi a 1330 milioni di tonnellate nel 1938, mentre dal 1939 si ebbe una nuova diminuzione per l'inizio della Seconda guerra mondiale.

L'importanza del carbone, rispetto alle altre fonti energetiche, è andata progressivamente diminuendo perciò dalla metà del 20° secolo, il suo impiego è stato largamente sostituito dagli idrocarburi e da altre fonti energetiche, è diminuito anche in ragione dell'accresciuta sensibilità nei confronti delle questioni ambientali, nel tentativo soprattutto di ridurre le emissioni inquinanti derivanti dalla combustione del carbone, ma malgrado ciò ancor oggi il rimane un combustibile assolutamente importante, infatti un quarto dell'energia elettrica tutto il mondo viene prodotta usando il carbone. Negli Stati Uniti circa la metà dell'elettricità è generata dal carbone. In Italia la quota è del 17%. Il carbone attualmente produce il 23,3% del fabbisogno energetico mondiale.

L'impiego del carbone come fonte energetica presenta, ancor oggi, anche alcuni importanti vantaggi legati, per esempio, alla competitività dei suoi prezzi e alla mancanza di tensioni capaci di ingenerare pressioni destabilizzanti sul mercato. Fondamentale è anche la maggiore equità della ripartizione delle riserve e la loro abbondanza ( si stima che fino ad ora sia stato sfruttato solo il 10% delle scorte mondiali ) rispetto ad altre fonti energetiche: considerando gli attuali livelli di produzione e l'entità delle riserve mondiali (valutate in oltre 900 miliardi di tonnellate), si stima che la produzione potrebbe continuare per ben oltre due secoli, un periodo di tempo più che triplo rispetto a quello stimato per la produzione di petrolio. Una decisiva influenza nella salvaguardia del ruolo del carbone è anche esercitata dal progressivo aumento che si registra nel consumo di energia nei paesi in via di sviluppo, in particolar modo quelli asiatici. In Cina, resta la principale risorsa energetica infatti viene ancora ampiamente utilizzato nel settore industriale, a differenza di quanto avviene nella maggior parte del resto del mondo, questo per le abbondanti riserve a disposizione e per la scarsa disponibilità di petrolio e gas naturale.



La principale prospettiva di impiego del carbone è come combustibile nelle centrali termoelettriche. A riguardo il suo utilizzo al posto dell'olio combustibile presenta alcuni svantaggi: necessità di disporre di adeguate infrastrutture per lo scarico e lo stoccaggio nei terminali costieri; rischio di inquinamento ambientale in relazione sia al maggior contenuto di ossido di carbonio, di composti solforati e di particelle solide nelle emissioni gassose delle centrali sia alle enormi quantità di residui solidi della combustione (ceneri) da smaltire. Alcuni degli inconvenienti legati all'impiego possono essere superati adottando tecniche in fase di prima applicazione: utilizzazione delle ceneri come materiali di riempimento nella realizzazione delle opere di potenziamento portuale indispensabili per assicurare una adeguata capacità di ricezione; impiego dei carbodotti, impianti di trasporto del carbone che, per la loro stessa conformazione, costituiscono il mezzo più efficace al fine di evitare o limitare il trasporto per via marittima; impiego di filtri e di precipitatori elettrostatici per il trattamento dei fumi.

Tuttavia, essendo costituito quasi interamente da carbonio, è il combustibile che produce più anidride carbonica per unità di energia prodotta e più polveri sottili, oltre a quantità variabili di anidride solforosa, a seconda del luogo dal quale è stato estratto. L'anidride solforosa reagisce con l'acqua, formando acido solforoso tornando sulla terra sotto forma di pioggia acida. Il carbone contiene anche tracce di altri elementi, compresi l'arsenico, il mercurio, l'uranio e altri isotopi radioattivi naturali, che sono pericolosi se rilasciati nell'ambiente.

Oltre agli aspetti ambientali, ce ne sono anche di sociali ed economici molto pesanti e fastidiosi.

- **Problemi sociali:** Oltre alle conseguenze sanitarie legate all'inquinamento, vi sono le miniere a cielo aperto che hanno un enorme impatto ambientale. Quelle tradizionali, invece, solitamente si spingono a più di 200 metri di profondità, in cunicoli polverosi e con alte temperature (intorno ai 30 °C). Questo comporta, anche con le più moderne tecnologie minerarie, forti rischi per la salute dei minatori e una considerevole mortalità, sia per la possibilità di contrarre malattie come la silicosi, che per incidenti dovuti all'incendio dei gas prodotti dal carbone, innescati anche solo da una piccola scintilla. Ogni anno, solo in Cina, muoiono più di 5000 minatori; nonostante questo, alcuni enti elettrici continuano a favorire il lavoro dei minatori per poter così acquistare il carbone ad un prezzo più basso che nel resto del mondo, speculando sulla morte di questi. Inoltre, i gas prodotti dall'attività della miniera comportano un effetto serra importante, che viene stimato superiore alla CO<sub>2</sub> rilasciata dalla combustione del carbone estratto.
- **Problemi economici:** Vanno osservati due aspetti, da un lato, se come si diceva il carbone costa poco, questo è dovuto ai Paesi dove si estrae, infatti estrarre il carbone costa poco dove la manodopera è a buon mercato, gli standard di sicurezza nelle miniere sono minimi, i diritti sindacali dei lavoratori sono pochi o inesistenti e la normativa ambientale inesistente (non a caso la produzione di

## *CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE*

carbone in Europa Occidentale e nel Nord America ha iniziato a declinare dagli anni '70 e oggi i principali produttori sono Paesi in via di sviluppo). Il secondo aspetto è che i settori industriali che usano molto carbone sono quelli pesanti, cioè siderurgico e metallurgico, e sono fortemente inquinanti. Anche questi hanno iniziato, da una ventina d'anni, a "traslocare" in paesi dove inquinare costa meno. Oggi i cieli dell'Europa e dell'America sono più limpidi di qualche decennio fa, ma i principali utilizzatori di carbone sono Cina ed India e da una decina d'anni un'immensa nuvola grigio-giallastra, visibile dallo spazio, si staglia sopra le loro regioni industriali.



*Fig. 1.2.3: Giacimento di carbone in Antartide di 250 milioni di anni fa*

### 1.2.2 IL PETROLIO

Circa un terzo dell'energia consumata oggi nel mondo deriva dal petrolio, il suo uso è alla base del sistema dei trasporti su gomma e non, ed è indispensabile anche nel settore dell'industria pesante, del riscaldamento, della produzione elettrica e nella chimica, tuttavia, il suo utilizzo comporta un rilevante inquinamento ambientale e le riserve a disposizione sono limitate ed in rapido esaurimento, al punto che svariati esperti ne danno per certo l'esaurimento nel corso del secolo. Non solo, si stima che la sua produzione, agli attuali ritmi di consumo, inizierà a declinare molto presto, tra 20-40 anni.



*Fig.1.2.4: Stazione di pozzi petroliferi*

Tutto questo creerà non pochi problemi : dal prezzo che aumenterà sempre più, pesando seriamente sulle economie in larga scala, alla crescita sempre più seria dell'instabilità politica e sociale nelle poche aree in cui è ancora abbondante (tensioni internazionali, attriti e guerre vere e proprie). Tali problemi ne impongono la sua rapida sostituzione con altre forme di energia e ridurne velocemente l'uso seppur sia ormai molto complicato non diviene quindi una questione semplicemente ambientale o economica, ma anche etica e di rispetto nei confronti di questo nostro Mondo martoriato.

Senza dimenticare poi i gravissimi danni ambientali che spesso si hanno in caso di perdite in mare di petrolio, sia per avarie nei sistemi di trasporto come oleodotti o navi, sia per fuoriuscite da giacimenti sottomarini. Anche gli incendi di pozzi petroliferi sulla

## *CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE*

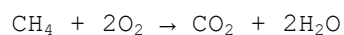
terraferma spesso sono fonte di perdite di vite umane e rilascio in atmosfera di ingenti quantitativi di sostanze inquinanti. In figura 1.2.5 un'immagine esemplificativa dei danni prodotti alle spiagge in caso di fuoriuscita di petrolio greggio nell'ambiente da parte di una nave petroliera.



*Fig. 1.2.5: Eloquentissima immagine relativa ad un ecosistema danneggiato da una fuoriuscita di petrolio*

### **1.2.3 IL GAS NATURALE O GAS METANO**

Il metano è un eccellente combustibile poiché produce il maggior quantitativo di calore per massa unitaria. Bruciando una molecola di metano in presenza di ossigeno si forma una molecola di CO<sub>2</sub> (anidride carbonica), due molecole di H<sub>2</sub>O (acqua) e si libera una gran quantità di calore secondo la reazione:





La maggior parte del metano viene ottenuta per estrazione dai giacimenti sotterranei, dove spesso è abbinato ad altri idrocarburi, frutto della decomposizione di sostanze organiche sepolte in profondità in tempi preistorici. Infatti la cellulosa dei vegetali fuori del contatto dell'aria si decompone in anidride carbonica e metano, analogamente si può ottenere, dai rifiuti solidi urbani, dai fanghi residuati dal trattamento di acque di scarico, da materiali di scarto di varia origine (per es. agricola), dagli scarichi di insediamenti zootecnici ecc. possono aversi, per opera di batteri anaerobici (batteri metanigeni, *ometano batteri*). Il metano così ottenuto si dice metano biologico o *biogas* per distinguerlo dal metano naturale, che si ritrova cioè in natura, e dal metano tecnico ottenuto nell'industria come sottoprodotto in alcuni impianti. Le principali fonti di emissione di metano nell'atmosfera sono:

- decomposizione di rifiuti solidi urbani nelle discariche
- fonti naturali (paludi): 23%
- estrazione da combustibili fossili: 20%
- processo di digestione degli animali (bestiame): 17%
- batteri trovati nelle risaie: 12%
- riscaldamento o digestione anaerobica delle biomasse.

Dal 60% all'80% delle emissioni mondiali è di origine umana. Esse derivano principalmente da miniere di carbone, discariche, attività petrolifere, gasdotti e agricoltura.



Fig.1.2.6: La caratteristica fiamma blu del metano

Il metano è inodore, incolore e insapore, quindi per essere distribuito nelle reti domestiche deve essere "odorizzato" mediante un processo di lambimento di un liquido

dal caratteristico "odore di gas" che spesso si tratta del tetraidrotiofene. Questo procedimento si rende indispensabile in modo da rendere avvertibile la presenza di gas nell'ambiente e diminuirne la pericolosità.

E' da molto tempo utilizzato in Italia come combustibile per autotrazione, sin dagli anni trenta, quando la politica dell'autarchia del regime fascista spinse la tecnologia nazionale del momento a cercare nuove soluzioni per l'utilizzo di carburanti alternativi come il gasogeno e il gas naturale.

Il metano spesso viene detto anche impropriamente "gas di città", perché risulta essere una miscela di più gas, oggi è utilizzato per generare più del 20% dell'energia, soprattutto nel settore elettrico, del riscaldamento, in cucina e per uso domestico. Tra tutti i combustibili fossili è certamente il più pulito, la sua combustione genera quantità di sostanze inquinanti enormemente più basse di quelle causate da carbone e petrolio. Esso è anche il combustibile fossile che produce meno anidride carbonica. Purtroppo però è costoso e la sua disponibilità è di poco maggiore di quella del petrolio, per di più agli esperti è noto che circa due terzi del metano estratto non viene utilizzato perché il costo del trasporto del gas naturale nei gasdotti è quattro volte superiore a quello del petrolio, poiché la densità del gas è molto minore. Il metano è presente normalmente nei giacimenti di petrolio (ma esistono anche immensi giacimenti di solo metano). Deriva dalle rocce madri, da cui derivano progressivamente (attraverso il *cracking* del *kerogene*) tutti gli idrocarburi.

Quando si estrae il petrolio, risale in superficie anche il metano, in media in quantità pari allo stesso petrolio. Se i giacimenti sono lontani dai luoghi di consumo o situati in mare aperto, risulta quasi impossibile usare quel metano, che pertanto viene bruciato all'uscita dei pozzi senza essere utilizzato in alcun modo, oppure viene ripompato nei giacimenti di petrolio, mediante l'uso di compressori centrifughi o alternativi, favorendo ulteriormente l'uscita del greggio grazie alla pressione .

Il metano è un gas serra presente nell'atmosfera terrestre (Fig. 1.2.7) in concentrazioni molto inferiori a quelle della CO<sub>2</sub> ma con un potenziale di riscaldamento globale ben 23 volte superiore così risulta responsabile del 20% dell'incremento dell'effetto serra, per cui in definitiva, seppur rispetto al petrolio e al carbone il metano dal punto di vista ambientale presenti molti aspetti migliorativi nemmeno questa si può considerare la soluzione definitiva ai problemi energetici.

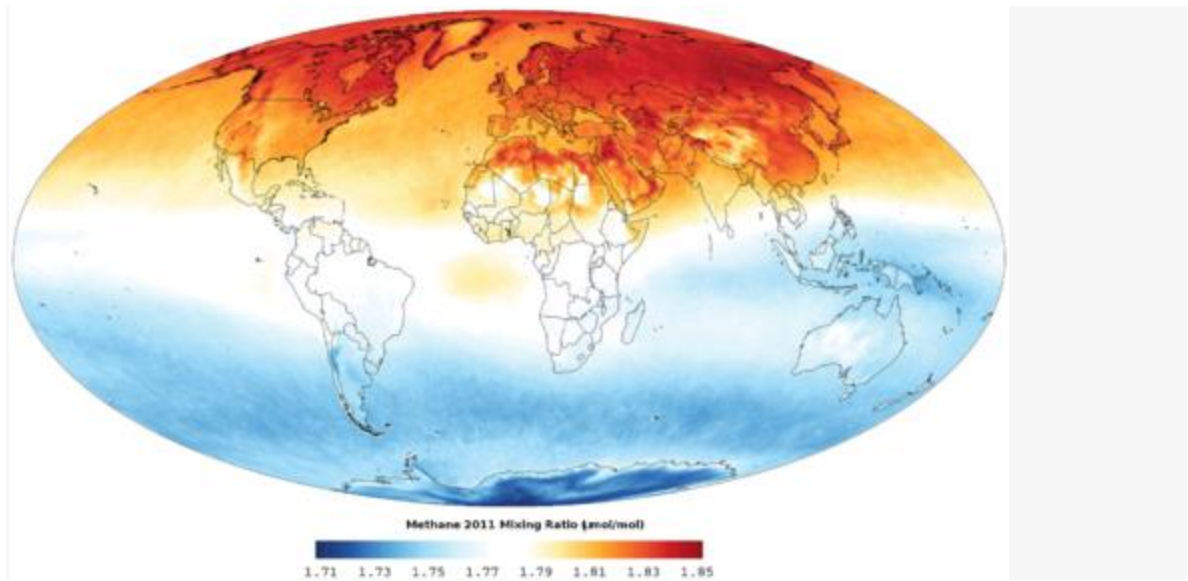


Fig. 1. 2.7: Media della concentrazione annuale del metano nella troposfera nel 2011 (in ppm).

### 1.2.4 L'ENERGIA NUCLEARE

L'energia nucleare è una fonte energetica da valutare attentamente sia negli aspetti positivi che negativi. In primo luogo è necessario comprendere il suo funzionamento. Nelle centrali nucleari (Fig. 1.2.8) l'energia scaturisce dal bombardamento dell'uranio con neutroni. Il nucleo dell'uranio si divide in due nuclei più piccoli tramite un processo detto di “fissione nucleare” durante il quale si genera energia e altri neutroni che, a loro volta, continueranno a far dividere i nuclei di uranio dando luogo alla famosa “reazione a catena nucleare”. Durante questo processo viene emessa radioattività ad alta intensità.



Fig.1.2.8: Una centrale nucleare con le caratteristiche torri di evacuazione dei vapori

Gli oggetti e i metalli esposti alle radiazioni diventano essi stessi radioattivi, ossia scorie radioattive. Le scorie dovranno essere stoccate per migliaia di anni fin quando non decade il livello di radioattività. Il grado di radioattività non consente all'uomo di avvicinarsi alle scorie e, al momento, la scienza non è in grado di distruggere le scorie radioattive o di accelerare il periodi di decadimento della radioattività.

L'uranio è la materia prima delle centrali nucleari a fissione. Una minima quantità di uranio consente di produrre un'elevata quantità energia, e a differenza del carbone o del petrolio, senza emissioni di anidride carbonica (principale causa dell'effetto serra). Non esistono stime ufficiali sull'estrazione annuale di uranio. Questi dati sono coperti dal segreto militare o dal segreto di Stato. Fin qui i vantaggi che hanno determinato lo sviluppo dell'energia nucleare nella seconda metà del novecento.

Su altri aspetti il nucleare non trova ancora valide risposte:

- Il principale svantaggio del nucleare sono le drammatiche conseguenze in caso di incidente. L'epilogo di Chernobyl ha causato conseguenze globali e, ancora oggi, non si conosce il reale impatto sulla salute. Se da un lato le nuove centrali di ultima generazione garantiscono un livello di sicurezza elevato, dall'altro non si può fare a meno di pensare che anche la centrale di Chernobyl era stata considerata sicura a suo tempo.
- Le scorie radioattive devono essere stoccate per migliaia di anni. Nessun paese al mondo è giunto a una soluzione definitiva di stoccaggio. In Italia, nel 2003 si fermò in protesta un'intera regione italiana per impedire la realizzazione di un deposito geologico di scorie.
- La produzione di armi nucleari resta l'ultimo grande handicap. Non si può negare un legame tecnologico tra la produzione civile di energia nucleare e l'industria bellica. Nel 2004 gli USA e altri paesi occidentali fecero grande pressione sull'Iran per impedire la costruzione di una centrale nucleare civile proprio per il timore che questi impianti fossero utilizzati anche per finalità belliche. Pertanto il legame tra le due attività esiste.
- Il costo reale del nucleare. Da circa 15 anni nessun paese occidentale, salvo la Finlandia, ha messo in cantiere nuove centrali nucleari. Il nucleare comporta costi elevati fin dalla realizzazione degli impianti. Vanno poi ad aggiungersi i costi militari per garantire la sicurezza dagli attentati terroristici e i costi per smantellare la centrale nucleare al termine della sua attività. Tutti questi costi non sono sostenibili da un'industria privata. Lo Stato deve necessariamente intervenire a copertura delle spese aumentando tasse e imposte ai contribuenti. In breve, il basso costo dell'energia in bolletta potrebbe essere più che compensato dall'aggravio fiscale in termini di imposte.
- La localizzazione degli impianti nucleari. Le comunità locali sono restie ad accettare un deposito di scorie o una centrale nucleare vicino casa.



Si sono considerati sia i pro sia i contro dell'energia nucleare. Volendo sintetizzare il nucleare a fissione realizzato con reattori di ultima generazione è relativamente sicuro. Resta però il problema dei costi sociali e quello della localizzazione delle centrali e del deposito di scorie. Finora nessuna soluzione sembra essere stata condivisa con i cittadini del luogo destinato ad ospitare un deposito di scorie.

### ***1.3 FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI***

Per energie rinnovabili si intendono quelle forme di energia che per loro caratteristica intrinseca si rigenerano almeno alla stessa velocità con cui vengono consumate o non sono "esauribili" nella scala dei tempi "umani" e, per estensione, il cui utilizzo non pregiudica le risorse naturali per le generazioni future. Sono dunque forme di energia alternative alle tradizionali fonti fossili e molte di esse hanno la peculiarità di essere anche energie pulite ovvero di non immettere in atmosfera sostanze nocive e/o climalteranti quali ad esempio l'anidride carbonica. Esse sono dunque alla base della cosiddetta economia verde.



*Fig. 1.3.1: Sole e vento: due fonti di energia rinnovabile immense*

Rientrerebbero in questo campo dunque:

- energia geotermica
- energia idroelettrica
- energia marina
  - energia delle correnti marine

## CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE

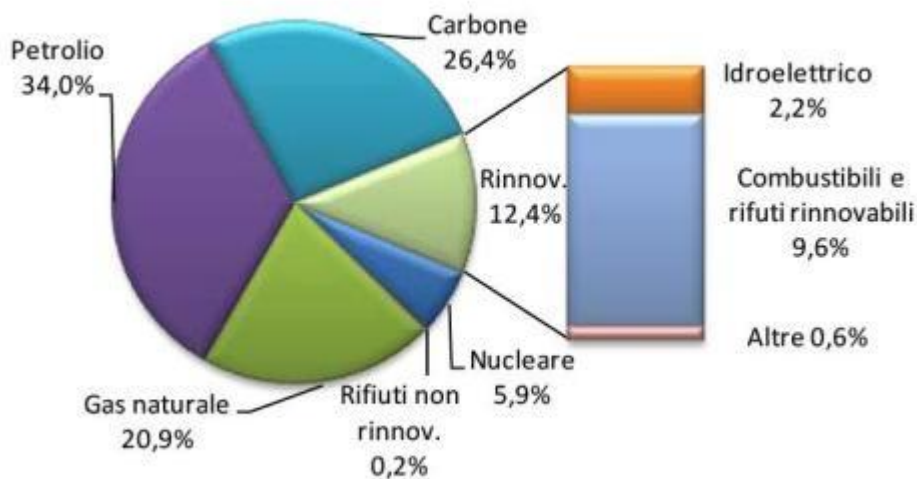
- energia a gradiente salino (osmotica)
- energia mareomotrice (o delle maree)
- energia del moto ondoso
- energia talassotermica (OTEC)
- energia solare
  - solare termico e termodinamico
  - solare fotovoltaico
- energia eolica
- energia da biomasse (o agroenergie)
  - biocarburanti, gassificazione
  - oli vegetali
  - cippato
- energia o cogenerazione da acqua di falda

Nell'ambito della produzione di energia elettrica le fonti rinnovabili vengono inoltre classificate in "fonti programmabili" e "fonti non programmabili", a seconda che possano essere programmate in base alla richiesta di energia oppure no. Secondo la definizione del Gestore dei Servizi Energetici nel primo gruppo rientrano "impianti idroelettrici a serbatoio e bacino, rifiuti solidi urbani, biomasse, impianti assimilati che utilizzano combustibili fossili, combustibili di processo o residui", mentre nel secondo gruppo (non programmabili) si trovano "impianti di produzione idroelettrici fluenti, eolici, geotermici, fotovoltaici, biogas".

La spinta decisiva che ha portato a studiare delle alternative ai combustibili fossili, nasce a seguito della crisi energetica del 1973 quando i paesi arabi aumentarono improvvisamente il prezzo del greggio causando un incremento globale del costo di tutti i suoi derivati quali carburanti e soprattutto energia elettrica. A seguito di questo avvenimento i paesi più industrializzati hanno capito l'importanza di essere indipendenti dal punto di vista energetico ed hanno iniziato in maniera intensiva la ricerca di tecnologie innovative. La tematica si intreccia anche con il problema del riscaldamento globale e delle emissioni di anidride carbonica: una definizione parallela di energie rinnovabili riguarda quindi anche il fatto che esse non contribuiscano all'aumento dell'effetto serra (pur fra difficoltà di effettiva verifica delle emissioni effettive e reali di tutta la filiera energetica/produttiva), sebbene anche in questo caso sia più rigoroso parlare di energia sostenibile, essendo l'accento posto sugli effetti ambientali della produzione di energia, piuttosto che sulle fonti da cui viene ottenuta.

Le fonti rinnovabili generalmente dette "classiche" sono quelle che vengono sfruttate per la produzione di energia elettrica fin dall'inizio dell'età industriale. Le prospettive di uso futuro dipendono dall'esplorazione delle risorse potenziali disponibili, in particolare nei paesi in via di sviluppo e dalle richieste in relazione all'ambiente e all'accettazione sociale. Tra le più antiche si trovano certamente le centrali idroelettriche, le centrali geotermiche .

Le fonti rinnovabili invece così dette “di nuova generazione” sono in forte crescita principalmente in paesi come la Germania, la Spagna, gli Stati Uniti e il Giappone. La sfida è allargare le basi di mercato per una crescita continuativa in tutto il mondo (Fig.1.3.2). Sono ad esempio i sistemi di riscaldamento solare con tecnologie di seconda generazione, l’energia eolica, l’energia degli oceani, ed altre tecnologie che sono ancora in corso di sviluppo come la gassificazione avanzata delle biomasse, le tecnologie di bioraffinazione, le centrali solari termodinamiche, l’energia geotermica da rocce calde e asciutte (Hot-dry-rocks) e lo sfruttamento dell’energia oceanica.



Fonte: IEA – Renewables Informations 2009

Fig.1.3.2: Offerta di energia primaria mondiale nel 2007: quota per fonte, si notino a destra le fonti rinnovabili

Per quel che riguarda l’Italia, da lungo tempo (fino a circa i primi anni sessanta) la produzione energetica è stata in larga parte rinnovabile, grazie in particolare alle centrali idroelettriche dell’arco alpino e, in misura minore, dell’Appennino (oltre a quote minori relative alla geotermia in Toscana). Oggi tuttavia, a causa dell’accresciuta richiesta di energia, nonché al quasi esaurimento della possibilità di nuove grandi installazioni idroelettriche, le rinnovabili rappresentano quote minori della produzione. Nel 2010 l’Italia ha prodotto circa 76,9 TWh di elettricità da fonti rinnovabili, pari al 22,2% del fabbisogno nazionale lordo, con il 15,8% proveniente da fonte idroelettrica e la restante parte data dalla somma di geotermico, eolico e combustione di biomassa o rifiuti. Con tali valori, circa il 90% della produzione rinnovabile è prodotto con impianti definiti “programmabili”. Con tali valori, l’Italia risulta essere il quinto produttore di elettricità da fonti rinnovabili nell’Unione Europea.

## CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE

*Produzione di energia rinnovabile in Italia per regione (2010) Fonte: GSE - Gestore Servizi Energetici*

<b>Regione</b>	<b>%</b>
Lombardia	17,6%
Trentino-Alto Adige/Südtirol	13,7%
Piemonte	9,7%
Toscana	9,0%
Veneto	6,5%
Puglia	5,0%
Calabria	4,8%
Campania	3,9%
Emilia-Romagna	3,8%
Valle d'Aosta	3,8%
Sicilia	3,4%
Abruzzo	3,2%
Friuli-Venezia Giulia	3,0%

Umbria	2,9%
Sardegna	2,7%
Lazio	2,5%
Basilicata	1,5%
Molise	1,3%
Marche	1,2%
Liguria	0,5%

Quindi in definitiva le risorse rinnovabili sono fonti di energia che possono permettere uno sviluppo sostenibile all'uomo, senza che si danneggi la natura e per un tempo indeterminato. Tuttavia è ancora oggetto di discussione il fatto che sia realmente possibile soddisfare tutto l'attuale fabbisogno energetico del pianeta solo con il potenziale energetico proveniente da fonte rinnovabile, in particolare nei paesi maggiormente industrializzati; permangono ad esempio problemi riguardo "l'aleatorietà" (o "intermittenza") e la "non programmabilità" di molte delle fonti di energia rinnovabile, inoltre è noto che necessitano di siti con specifiche caratteristiche territoriali ed ambientali (aree ventilate e libere da ostacoli per l'eolico e aree soleggiate ed estese per il solare) tali da rendere conveniente la loro installazione solo in determinati territori, che quindi impongono un ripensamento globale delle reti elettriche e la necessità di costruire grandi infrastrutture per lo stoccaggio dell'energia, come ad esempio bacini idroelettrici di pompaggio o la costruzione (con materiali rari o inquinanti) di accumulatori elettrochimici.

### 1.3.1 L'ENERGIA IDROELETTRICA

Negli impianti idroelettrici l'acqua di un lago o di un bacino artificiale viene convogliata, attraverso condutture forzate, a valle trasformando così la sua energia potenziale in energia di pressione e cinetica grazie al distributore e alla turbina. L'energia cinetica viene poi trasformata attraverso il generatore elettrico in energia elettrica. Quindi la potenza di un impianto idroelettrico dipende da due fattori: il salto (dislivello esistente tra la quota a cui è disponibile la risorsa idrica e il livello a cui la stessa passa attraverso le turbine) e la portata (massa d'acqua che fluisce nella turbina espressa per unità di tempo).

Componenti basilari di un impianto di questo tipo (Fig. 1.3.3) sono quindi un bacino di raccolta acqua, una o più condotte forzate entro le quali il fluido può accrescere la sua velocità, una o più turbine idrauliche accoppiate a generatori elettrici.

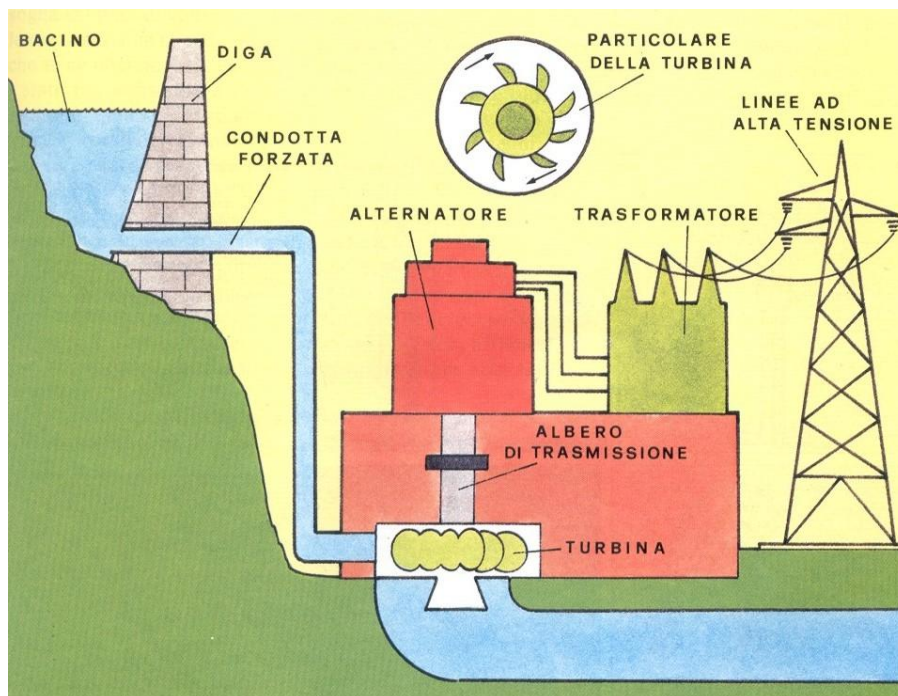


Fig.1.3.3: Schema di un impianto idroelettrico

Il bacino di riserva è generalmente ottenuto sbarrando tramite una diga il corso di un fiume all'interno di una vallata: forma e dimensioni del bacino sono quindi solitamente delineate dalle caratteristiche geologiche della zona.

Grazie alle peculiarità dell'energia ottenuta da fonte idraulica, essa rappresenta una fonte energetica in grado di rispondere ad improvvisi "carichi di punta" di richiesta energetica da parte delle utenze finali.

Le centrali idroelettriche vantano, infatti, il vantaggio di poter entrare in funzione in tempi molto rapidi per poter far fronte a richieste di energia non



preventivate da parte degli utenti. Inoltre, queste centrali, sono contraddistinte dalla capacità di uniformarsi all'andamento, mutevole, del carico nei periodi di punta così come dalla possibilità di riaccensione della rete elettrica nell'ipotesi di black-out.

Si punta oggi ad incentivare la costruzione di piccole centrali al fine di evitare i forti impatti causati dalle grandi infrastrutture.

Per rispondere alla domanda di turbine adatte ad operare in impianti di piccola taglia, in principio, la maggior parte dei costruttori presenti sul mercato ha percorso la strada della miniaturizzazione delle turbine tradizionali di elevata potenza, atte cioè ad operare in grandi centrali, al fine di sfruttare le conoscenze già acquisite a quel momento. Questa linea di azione ha però sortito un effetto negativo consistente in un brusco rallentamento subito dal settore dedicato allo studio di soluzioni innovative idonee ad operare in centrali di poche migliaia di chilowattora.

Esistono diverse tipologie di impianti idroelettrici:

- Impianti a deflusso regolato: questi impianti possono presentare un bacino idrico naturale (come i laghi) o artificiale. Quando si utilizzano bacini naturali molto spesso si interviene con sbarramenti (consistenti anche in dighe alte decine di metri) al fine di aumentare la capienza (questi bacini possono essere anche usati come accumulatori di energia da utilizzare nelle ore di punta pompando acqua da valle a monte nelle ore notturne, a minor richiesta energetica). Generalmente queste centrali sono superiori ai 10 MW di potenza e possono arrivare anche a potenze e dimensioni enormi (come ad esempio nell'impianto di Itaipu in Brasile che ha un bacino di 1.460 Km<sup>2</sup>, pari a 4 volte il Lago di Garda).
  - Impianti ad accumulo o a serbatoio: sono impianti che presentano le medesime caratteristiche degli impianti tradizionali ma che ricavano la disponibilità di acqua nel serbatoio superiore mediante sollevamento effettuato grazie a specifiche pompe (ma si può utilizzare anche la stessa turbina di generazione). Questi impianti sono composti da due serbatoi collocati a differenti quote: nelle ore di maggior richiesta energetica l'acqua immagazzinata nel serbatoio superiore viene usata per la produzione di energia elettrica; nelle ore di minor richiesta, come quelle notturne, la stessa acqua viene risollevata e ricondotta nel serbatoio superiore.
- La diffusione di un gran numero di questi impianti, anche se di dimensioni medio-piccole, consentirebbe da un lato una maggiore ritenzione di acqua nel territorio e, da un altro lato, la possibilità di attenuare possibili fenomeni alluvionali, dato che, in caso di abbondanti piogge i serbatoi sarebbero riempiti senza la necessità di pompare acqua da valle a monte.
- Impianti ad acqua fluente: questo tipo di impianti era molto più usato all'inizio del secolo scorso; oggi il loro potenziale è largamente sottoutilizzato

nonostante l'impatto ambientale sia decisamente limitato. Questi impianti non dispongono di attrezzature tecniche in grado di regolare l'afflusso dell'acqua, di conseguenza la portata sfruttata coincide con quella disponibile nel corso d'acqua in quel momento. Da ciò deriva che la turbina produce con modi e tempi totalmente dipendenti dalla disponibilità del corso d'acqua.

- Impianti inseriti in condotte idriche: una interessante possibilità recentemente considerata dai tecnici è quella dell'inserimento, in un canale o in una condotta per l'approvvigionamento idrico, di impianti per la generazione di elettricità. L'acqua potabile arriva nelle città attingendo acqua da serbatoi posizionati ad altezze superiori mediante l'utilizzo di apposite condotte (ad esempio a Genova l'acqua della città proviene da quote di altitudine molto elevate). L'idea consiste nel sostituire le valvole che regolano l'afflusso dell'acqua agli impianti di trattamento dell'acquedotto con turbine che potrebbero generare energia elettrica come se fossimo in una centrale idroelettrica.



*Fig. 1.3.4.: La mastodontica diga di Ridracoli (Santa Sofia)*

Le turbine utilizzate nei vari impianti si differenziano in Pelton, Francis o Kaplan, a seconda del layout che si vuole utilizzare.

Si potranno infatti prospettare grandi dislivelli con ridotte portate o viceversa piccoli dislivelli con grandi portate.

L'energia idroelettrica è una fonte di energia considerata pulita (non vi sono emissioni), alternativa e rinnovabile, tuttavia la costruzione di dighe e grandi bacini o invasi artificiali, con l'allagamento di vasti terreni, apporta sempre e comunque un certo impatto ambientale che nei casi più gravi può provocare lo sconvolgimento

dell'ecosistema della zona con grandi danni ambientali. Costruire una diga infatti spesso significa trasformare un fiume ben ossigenato in un lago privo di ossigeno che impoverisce l'ecosistema mettendo a rischio molte delle specie autoctone viventi, come è successo con la grande diga di Assuan in Egitto, oppure si possono avere rischi di tipo idrogeologico come accaduto nel disastro del Vajont.

In Italia l'idroelettrico costituisce la più importante risorsa energetica interna (Fig. 1.14), rappresentando quasi il 25% della potenza efficiente lorda installata e fornendo il 13,2% della produzione elettrica lorda complessiva. La produzione idroelettrica, che si concentra nelle regioni settentrionali e in particolare in Lombardia, Piemonte e Trentino, costituisce inoltre il maggior contributo nazionale (75%) della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

L'idroelettrico invece a livello mondiale costituisce la più importante e tradizionale fonte di energia rinnovabile e ad oggi copre il 20% della produzione complessiva di energia elettrica. Tuttavia, le diverse politiche di sfruttamento e la disomogenea disponibilità della risorsa si riflettono sui dati di potenza installate e di produzione nei diversi stati.

### ***1.3.2 L'ENERGIA SOLARE***

L'energia solare è la fonte primaria di energia sulla Terra che rende possibile la vita è infatti quell'energia normalmente utilizzata dagli organismi autotrofi, cioè quelli che eseguono la fotosintesi, detti anche "vegetali" (da cui derivano i combustibili fossili). Da essa derivano più o meno direttamente quasi tutte le altre fonti energetiche disponibili all'uomo quali i combustibili fossili, l'energia eolica, l'energia del moto ondoso, l'energia idroelettrica, l'energia da biomassa con le sole eccezioni dell'energia nucleare, dell'energia geotermica e dell'energia delle maree. Può essere utilizzata direttamente a scopi energetici per produrre calore o energia elettrica con varie tipologie di impianto.

Mediamente il Sole irradia alle soglie dell'atmosfera terrestre  $1367 \text{ W/m}^2$ , nota come costante solare e distribuita secondo lo spettro solare. Tenendo conto del fatto che la Terra è una sfera che oltretutto ruota, l'irraggiamento solare medio o insolazione è, alle latitudini europee, di circa  $200 \text{ W/m}^2$ . Moltiplicando questo valore per quello della superficie dell'emisfero terrestre esposto al sole in un determinato istante, si ottiene una potenza superiore ai 50 milioni di GW (per poter fare un paragone, si tenga presente che la potenza media di una grande centrale elettrica si aggira attorno ad 1 GW).

La quantità di energia solare che arriva sul suolo terrestre è quindi enorme, circa diecimila volte superiore a tutta l'energia usata dall'umanità nel suo complesso, ma poco concentrata, nel senso che è necessario raccogliere energia da aree molto vaste per averne quantità significative, e piuttosto difficile da convertire in energia facilmente

sfruttabile con efficienze accettabili. Per il suo sfruttamento occorrono prodotti tecnologici in genere di costo elevato che rendono attualmente l'energia solare notevolmente costosa rispetto ad altri metodi di produzione dell'energia. Lo sviluppo di tecnologie che possano rendere economico l'uso dell'energia solare è un settore della ricerca molto attivo ma che, per il momento, non ha avuto ancora risultati rivoluzionari.

Sono tre le tecnologie principali per trasformare in energia sfruttabile l'energia del sole:

- Il pannello solare termico (Fig. 1.3.5) sfrutta i raggi solari per scaldare un liquido con speciali caratteristiche, contenuto nel suo interno, che cede calore, tramite uno scambiatore di calore, all'acqua contenuta in un serbatoio di accumulo.



*Fig. 1.3.5 : Pannello solare termico*

I pannelli solari termici possono essere a circolazione naturale o a circolazione forzata; i primi utilizzano del liquido contenuto nei pannelli per consentirne la circolazione all'interno del sistema pannello di calore. In questo caso il serbatoio di accumulo che contiene lo scambiatore di calore deve trovarsi più in alto del pannello.

I sistemi a circolazione forzata utilizzano una pompa che fa circolare il fluido all'interno di scambiatore e pannello quando la temperatura del fluido all'interno del pannello è più alta di quella all'interno del serbatoio di accumulo, che, in questo caso, si trova più in basso dei pannelli.

- Il pannello fotovoltaico (Fig. 1.3.6) sfrutta le proprietà di particolari elementi semiconduttori per produrre energia elettrica quando sollecitati dalla luce convertono la luce solare direttamente in energia elettrica.



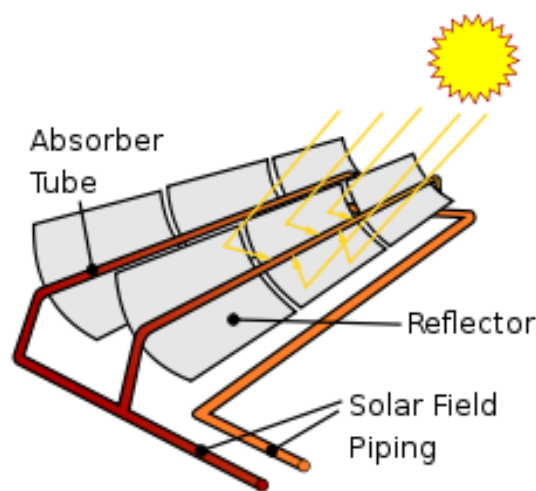
*Fig.1.3.6: Imponente distesa di pannelli fotovoltaici nel comune di Modena*

Questi pannelli, non avendo parti mobili o altro, necessitano di pochissima manutenzione: in sostanza vanno solo puliti periodicamente. La durata operativa stimata dei pannelli fotovoltaici è di circa 30 anni. I difetti principali di questi impianti sono il costo dei pannelli. Il secondo ovvio problema di questo genere di impianto è che l'energia viene prodotta solo durante le ore di luce e quindi non è adatta per qualunque situazione, essendo l'elettricità una forma di energia difficilmente accumulabile in grandi quantità. Va rilevato che tuttavia la produzione solare è maggiore proprio nei momenti di maggior richiesta, cioè durante il giorno e nelle stagioni calde, durante le quali può sopperire all'aumento di consumi dovuto agli impianti di ventilazione e condizionamento. I pannelli fotovoltaici vengono utilizzati spesso per alimentare dispositivi distanti dalle reti elettriche (sonde spaziali, ripetitori telefonici in alta montagna, ecc) o con richieste energetiche talmente ridotte che un allacciamento alla rete elettrica risulterebbe antieconomico (segnaletica stradale luminosa, parchimetri, ecc) e sconveniente dal punto di vista organizzativo. Ovviamente questi dispositivi devono essere dotati di accumulatori in grado di accumulare la corrente elettrica prodotta in eccesso durante la giornata per alimentare le apparecchiature durante le ore notturne e durante i periodi nuvolosi. Con le attuali tecnologie i pannelli fotovoltaici sono sensibili anche alla radiazione infrarossa (invisibile) dei raggi solari e dunque producono corrente



anche in caso di tempo nuvoloso e pioggia. La quantità d'energia erogata è tuttavia variabile e difficilmente prevedibile, questa discontinuità rende difficile soddisfare in ogni momento la domanda di corrente, a meno di una produzione con un largo margine di sicurezza al di sopra dei picchi annuali di domanda.

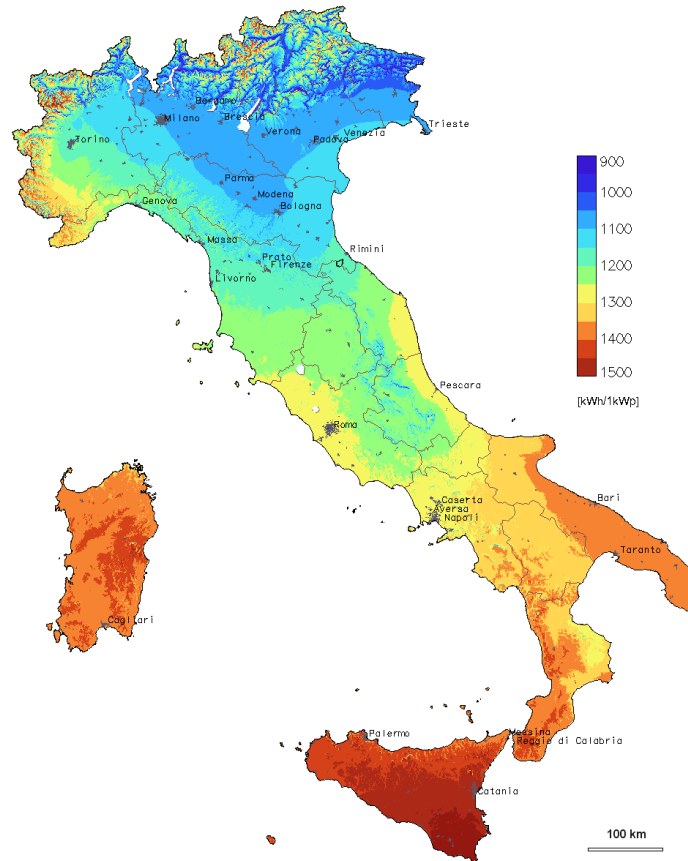
- Il pannello solare a concentrazione (Fig. 1.3.7) sfrutta una serie di specchi parabolici a struttura lineare per convogliare i raggi solari su un tubo ricevitore in cui scorre un fluido termovettore o una serie di specchi piani che concentrano i raggi all'estremità di una torre in cui è posta una caldaia riempita di sali che per il calore fondono. In entrambi i casi "l'apparato ricevente" si riscalda a temperature molto elevate (400 °C ~ 600 °C) (solare termodinamico)



*Fig. 1.3.7: Scema di funzionamento di un pannello solare a concentrazione*

Il pannello solare a concentrazione concentra i raggi solari su un opportuno ricevitore; attualmente il tipo più usato è quello a specchi parabolici a struttura lineare che consente un orientamento monodimensionale, più economico, verso il sole, e l'utilizzo di un tubo ricevitore in cui è fatto scorrere un fluido termovettore per il successivo accumulo di energia in appositi serbatoi. Il vettore classico è costituito da oli minerali in grado di sopportare alte temperature.





*Fig.1.3.8: Radiazione globale solare sul piano nazionale*

Le principali critiche all'utilizzo di energia solare sono imputabili ai costi, all'efficienza e alla caratteristica intrinseca di intermittenza o non programmabilità di tale fonte energetica rispetto alle fonti energetiche convenzionali in quanto risente direttamente della copertura nuvolosa e della completa assenza durante la notte.

I sostenitori dell'energia solare sostengono invece un ridimensionamento dei costi ed un aumento dell'efficienza nel futuro prossimo in virtù delle economie di scala e del miglioramento tecnologico dei futuri sistemi solari. Riguardo l'assenza di tale fonte energetica durante la notte fanno altresì notare che il picco massimo di consumo elettrico si raggiunge in realtà durante il giorno, cioè proprio durante il massimo di produzione di energia da solare, in virtù dell'utilizzo di energia elettrica da parte dei processi produttivi industriali e quindi il problema sarebbe meno gravoso e risolvibile tramite ricorso alla tecnologia del solare termodinamico e/o a differenziazione delle fonti energetiche rinnovabili quale ad esempio l'energia eolica.

### 1.3.3 L'ENERGIA GEOTERMICA

L'energia geotermica è stata fino al 1998 la forma di energia rinnovabile che ha dato il maggior contributo al bilancio energetico mondiale come produzione di elettricità. Col passare degli anni le altre fonti energetiche rinnovabili si sono sviluppate maggiormente riducendo di molto l'apporto della geotermica.

All'interno della crosta terrestre vi è un vero e proprio serbatoio di energia rappresentato dall'energia geotermica.

Tuttavia per un'effettiva possibilità di estrazione ed utilizzazione pratica di questo calore è necessaria la presenza di un veicolo che trasporti il calore nei pressi della superficie terrestre, a profondità tali da poter essere accessibile alle nostre tecnologie di perforazione. Questo veicolo è l'acqua che circola nel sottosuolo in zone caratterizzate dalla presenza di rocce porose e permeabili (Fig. 1.3.9).

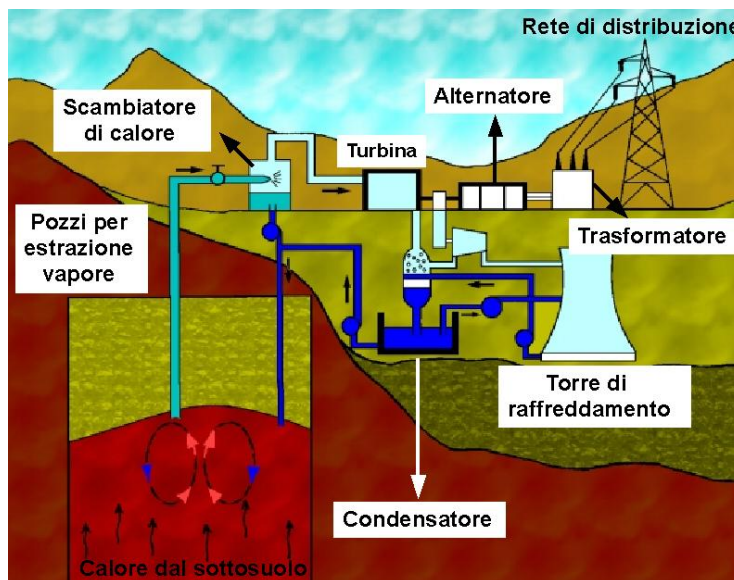


Fig. 1.3.9: Schema di funzionamento di una centrale geotermica

L'acqua, a contatto delle rocce calde, si riscalda e forma degli acquiferi che presentano, spesso, anche temperature elevate (oltre 300°C). Questi acquiferi sono i cosiddetti serbatoi geotermici ed in essi l'acqua può rimanere allo stato liquido o trasformarsi in vapore, ciò dipende dalle condizioni di temperatura e pressione in cui essa viene a trovarsi.

L'acqua, sia essa liquida o vapore, è in gran parte di origine meteorica e penetra nel sottosuolo attraverso le rocce permeabili più superficiali.

Quindi, la perforazione dei pozzi mette in comunicazione diretta la risorsa geotermica con la superficie per il successivo uso energetico del calore contenuto nel fluido individuato.

Le principali applicazioni del vapore naturale proveniente dal sottosuolo sono due:

- La produzione d'energia elettrica tramite il classico metodo delle turbine.
- Il calore geotermico incanalato in un sistema di tubature utilizzato per attività locali di riscaldamento.

Per alimentare la produzione del vapore acqueo si ricorre spesso all'immissione d'acqua fredda in profondità, una tecnica utile per mantenere costante il flusso del vapore. In questo modo si riesce a far lavorare a pieno regime le turbine e produrre calore con continuità. La geotermia resta comunque una fonte energetica marginale da utilizzare solo in limitati contesti territoriali laddove possibile

. La geotermia è la fortuna energetica dell'Islanda. La grande isola del nord Atlantico basa l'intera sua esistenza sul naturale equilibrio tra la presenza d'acqua calda in profondità e l'atmosfera esterna sotto zero. Dall'inizio del novecento l'Italia sfrutta il calore della Terra per produrre energia elettrica tramite la realizzazione di centrali elettriche geotermiche capaci di sfruttare la forza del vapore. In Italia la produzione di energia elettrica dalla geotermia (Fig. 1.20) è fortemente concentrata in Toscana (Pisa, Siena e Grosseto).

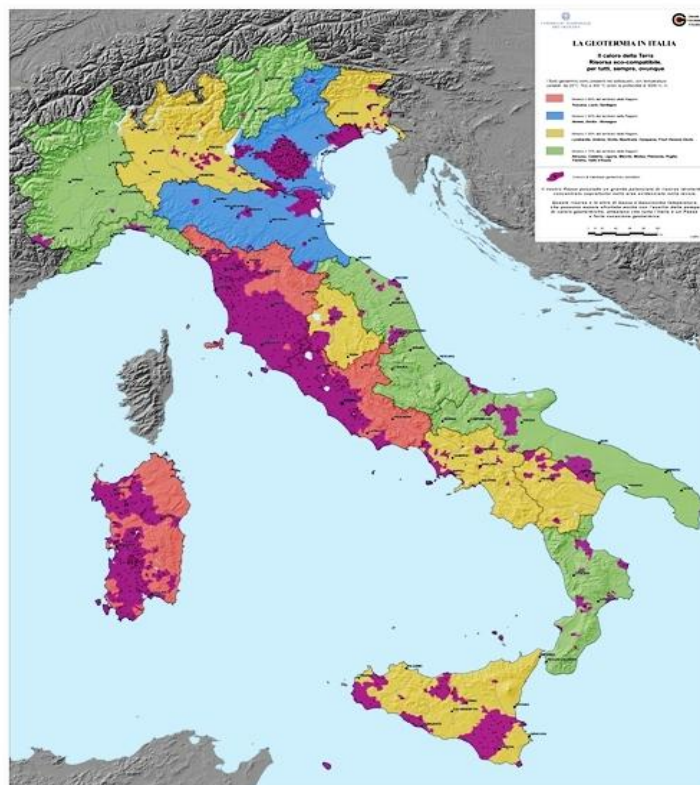


Fig.1.3.10: Mappa delle zone geotermiche italiane, quelle in viola sono le più prolifiche

A Larderello si trova uno dei primi impianti geotermici al mondo: i primi esperimenti del Principe Piero Ginori-Conti (risalgono al 1904). Gli impianti di Larderello (Pisa) hanno un'origine datata ben prima della metà dell'ottocento.

## *CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE*

Si possono trarre alcune importanti conclusioni positive e negative sulla geotermia. La fonte geotermica riceve in particolar modo tre critiche:

- Dalle centrali geotermiche fuoriesce insieme al vapore anche il tipico odore sgradevole di uova marce delle zone termali causato dall'acido solfidrico. Un problema generalmente tollerato nel caso dei siti termali ma particolarmente avverso alla popolazione residente nei pressi di una centrale geotermica. Il problema è, per fortuna, facilmente risolvibile mediante l'installazione di particolari filtri di abbattimento sui vapori in uscita.
- L'impatto esteriore delle centrali geotermiche può recare qualche problema paesaggistico. La centrale si presenta, infatti, come un groviglio di tubature anti-estetiche. Un'immagine che non dista comunque da quella di molti altri siti industriali o fabbriche. Il problema paesaggistico può essere facilmente risolto unendo l'approccio funzionale dei progetti ingegneristici con quello di un'architettura rispettosa del paesaggio e del comune senso estetico.
- Grandi difficoltà consistono nel individuare le zone più prolifiche per l'ottenimento di questo tipo di energia, infatti, per individuare una risorsa geotermica, sono necessarie diverse fasi a partire dalla necessaria esplorazione della superficie dell'area che si ritiene sfruttabile. Tramite questa imprescindibile fase vengono ricercate le informazioni al fine di decidere se e dove perforare pozzi allo scopo di effettuare una esplorazione in profondità alla ricerca di fluidi geotermici adatti allo sfruttamento energetico. In caso di esito positivo della fase di ricerca avrà luogo la perforazione di una quantità di pozzi atti a garantire un'entità di fluido adeguata alla produzione energetica.

Per il resto la geotermia consente di trarre dalle forze naturali rinnovabili una grande quantità di energia rinnovabile e pulita. I "giacimenti naturali di vapore" in Toscana producono ogni anno oltre 4 miliardi di kilowattora di elettricità nelle sole centrali toscane di Larderello e di Montieri.

### 1.3.4 L'ENERGIA DEL MARE

Gli oceani si estendono per circa i tre quarti della superficie terrestre e rappresentano una immensa fonte di energia termica, potenziale e cinetica. Nonostante questo, la ricerca non ha ancora maturato una tecnologia affermata a tal punto da rendere economicamente conveniente il suo sfruttamento. Di conseguenza questa fonte di energia è ancora considerata sperimentale e attualmente può contare solo su pochi prototipi in funzione.

L'energia che il mare può offrire è quella contenuta nelle maree, nel moto ondoso, nelle correnti e nel suo gradiente termico.

- L'energia delle maree è dovuta al movimento alternativo verso l'alto e verso il basso (flusso e riflusso) della superficie delle acque che due volte al giorno si sollevano per effetto dell'attrazione del Sole, ma soprattutto della Luna. Infatti, sebbene il Sole presenti una massa maggiore della Luna di 27 milioni di volte, è situato però, rispetto alla Terra, ad una distanza 289 volte più grande. Di conseguenza la forza di attrazione della Luna è più grande di quella del Sole di circa 2,2 volte. Il principio di funzionamento degli impianti che sfruttano questa energia consiste in una diga bassa che intrappola l'acqua al momento dell'alta marea; l'acqua viene così sollevata grazie all'energia gravitazionale del Sole e della Luna acquistando energia potenziale. Questa successivamente si trasforma in energia cinetica nel momento in cui l'acqua viene fatta cadere su di una turbina posta ad un livello più basso. La turbina è naturalmente accoppiata ad un generatore che produce elettricità così come avviene nelle centrali idroelettriche. Quindi la tecnica energetica sfrutta il dislivello tra l'alta marea e la bassa marea; la cosiddetta "ampiezza di marea". Una premessa è ovviamente un'ampiezza della marea sufficiente, come si verifica, ad esempio, sempre in Francia, a St. Malo dove tale valore è di circa 12-13 metri.

Tecniche più evolute prevedono che già durante il movimento verso l'alto della marea l'acqua attraversi la turbina generando così energia elettrica anche in questa fase.

In merito all'impatto ambientale questo può essere anche notevole dato che la costruzione degli sbarramenti necessari può alterare le condizioni idrauliche di una vasta area con effetti negativi per la navigazione, per l'industria locale della pesca e per le coste, soggette ad elevata erosione.

- L'energia del moto ondoso è configurabile come una particolare forma di energia solare; le onde marine generate dal vento posseggono sia energia cinetica che energia potenziale. Si è cercato di utilizzare l'energia delle onde al fine di generare elettricità con vari metodi il cui scopo, alla fine, è sempre quello di costringere una turbina a ruotare. Ci sono allo studio ipotesi per concentrare e focalizzare le onde in modo da aumentarne l'altezza e il potenziale di conversione in energia elettrica. Altre ipotesi prevedono invece di utilizzare le variazioni di pressione che si riscontrano al di sotto della superficie del mare; Una diversa tecnologia che utilizza il moto ondoso sfrutta l'ampiezza dell'onda ed è basata su una struttura semisommersa che, grazie al movimento dettato dalle onde, agisce su dei pistoni idraulici per azionare dei generatori.

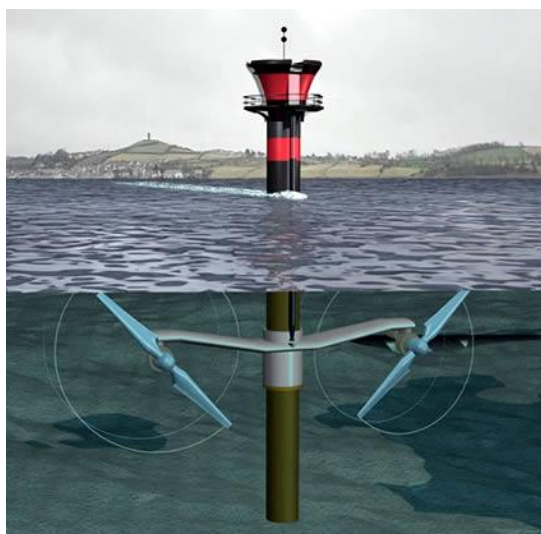
L'energia del moto ondoso è un'energia diluita nel senso che ha una bassa densità energetica. Cioè l'energia ricavabile da un unico impianto incontra dei limiti determinati dalla modesta superficie di mare che esso può utilizzare. Opinione diffusa è che la potenza elettrica massima di un impianto non possa superare i 10 MW ma le taglie più comuni saranno di 1 MW. Inoltre questa forma di energia presenta forti condizionamenti geografici: le coste occidentali del Regno Unito, degli Stati Uniti e quelle meridionali della Nuova Zelanda sembrano avere il regime ondoso più adatto per scopi energetici. Anche in questo caso l'impatto ambientale di questa forma di energia riguarda soprattutto la navigazione a causa della scarsa altezza sul mare degli impianti che li rende poco visibili anche ai radar. Esso può tuttavia venir minimizzato con opportuni dispositivi di segnalazione e la creazione di corridoi obbligati per la navigazione.

- L'energia delle correnti marine e della marea sono alcune delle fonti più interessanti ed inesplorate tra le fonti rinnovabili. Basti pensare che nella sola Europa la disponibilità di questa forma di energia è stimata in circa 75 GigaWatts. Le turbine per lo sfruttamento delle correnti marine possono essere sia ad asse orizzontale che verticale: le prime (Fig. 1.3.11) sono più adatte alle correnti marine costanti, come quelle presenti nel mediterraneo; le seconde sono più adatte alle correnti di marea per il motivo che queste cambiano direzione di circa 180° più volte nell'arco della giornata. Grazie a tali turbine, con solo 1 metro quadrato di area intercettata in una corrente di acqua che viaggia a 3 metri al secondo (pari a 11 Km/h), si possono produrre circa 3 kW. Una corrente di aria che intercetta 1 metro quadrato di area, per produrre gli stessi 3 kW, deve viaggiare a 28 m/s (pari a 101 Km/h).

Le forti correnti marine che attraversano lo Stretto di Messina hanno una potenzialità energetica pari a quella prevista dalla grande centrale idroelettrica cinese del Fiume Azzurro: circa 15.000 MW, sufficienti per



il fabbisogno di tutta la Calabria e di parte della Sicilia fino al 2050, con una spesa pari al 15% della grande opera cinese.



*Fig.1.3.11: Rappresentazione virtuale di una turbina marina ad asse orizzontale*

### **1.3.5 L' ENERGIA DA BIOMASSE**

Tra le risorse naturali cui attingere per soddisfare le necessità energetiche dell'umanità di fondamentale importanza è la biomassa (Fig. 1.3.12) , cioè la materia prima vegetale che costituisce, in natura, la forma più sofisticata di accumulo dell'energia solare. Con il termine "biomasse" si intendono, come noto, una molteplicità di materiali costituiti principalmente da: rifiuti con una componente organica o comunque combustibili, fanghi organici, scarti da allevamenti zootecnici, residui dell'agricoltura e dell'agroindustria, potature, residui della produzione risicola, olearia ecc... In tempi recenti si intendono inclusi nelle biomasse anche i prodotti di colture (come girasole, colza, soia) che possono essere impiegati per produrre energia.

Le biomasse si possono considerare risorse primarie rinnovabili e, quindi, inesauribili nel tempo, purchè vengano impiegate ad un ritmo complessivamente non superiore alle capacità di rinnovamento biologico. L'impiego energetico delle biomasse presenta anche una indiscutibile rilevanza ambientale: oltre agli effetti positivi sul contenimento della anidride carbonica atmosferica, dato che il carbonio emesso nell'atmosfera è stato "preso in prestito" dall'atmosfera stessa durante il processo di crescita della biomassa, la loro utilizzazione rappresenta spesso una valida soluzione a problemi di eliminazione dei rifiuti.

Molte utilizzazioni ai limiti della praticabilità, se considerate esclusivamente sotto

## CAPITOLO 1: LE FONTI ENERGETICHE

l'aspetto della resa energetica, possono altresì risultare interessanti se si considera anche il valore ambientale dell'intervento. Inoltre la possibilità di recuperare vaste aree marginali, oggi in stato di abbandono e degrado, per lo sviluppo di colture destinate alla produzione di biomassa porterebbe ad innegabili vantaggi di tipo socio-economico. Tuttavia in alcuni casi l'impatto ambientale delle biomasse può risultare non trascurabile. Nel caso di coltivazioni specifiche, per esempio la barbabietola, l'estensione di tali aree, perché abbiano significato energetico, può avere un impatto sfavorevole su diverse specie animali, in ragione delle modificazioni che queste coltivazioni comportano per l'habitat preesistente.

Anche l'accumulo di biomasse sul territorio, in attesa di processamento, può condurre all'inquinamento del suolo e delle falde acquifere a causa dell'inizio dei processi di fermentazione del materiale. Inoltre, se non controllata, la combustione provoca l'emissione di gas tossici quali anidride solforosa ed ossidi di azoto.

Le ceneri residue debbono anch'esse venire smaltite, tuttavia non presentano i rischi di quelle provenienti dal carbone poiché non ne contengono le sostanze tossiche.

Infine effluenti liquidi prodotti durante i processi di conversione delle biomasse possono essere usati come base per fertilizzanti, ma, se ciò non avviene, il loro impatto ambientale, se non smaltiti adeguatamente, può essere notevole.



*Fig.1.3.12: Tipologie di biomasse più comuni*

A questo punto è necessaria, per una chiarezza dell'esposizione, una classificazione della biomassa effettuata in base alle tipologie di utilizzo:

- Legna e residui legnosi: questi provengono, in genere, dalle lavorazioni di prodotti agricoli e forestali ma possono provenire anche da apposite coltivazioni. Utilizzando gli scarti della lavorazione del legno come combustibile è possibile, oltre che risolvere i problemi di smaltimento dei residui, anche sostituire il

consumo di combustibili fossili riducendo così, non solo le emissioni di anidride carbonica, ma anche quelle di zolfo di cui il legno è praticamente privo

- Biocombustibili(*Biofuel*) : ovvero combustibili liquidi ottenuti da biomassa che possono essere utilizzati sia come carburante per autoveicoli che come combustibile da riscaldamento.
- Biogas: cioè combustibili gassosi provenienti, principalmente, dalla fermentazione di residui dell'industria agro-alimentare.



## ***CAPITOLO 2***

# ***L'ENERGIA EOLICA***

### ***2.1 INTRODUZIONE***

L'energia eolica è l'energia ottenuta dal vento, che viene trasmessa sotto forma cinetica dalle correnti di aria e che è convertita e utilizzata in altre energie (elettrica o meccanica). Oggi viene per lo più convertita in energia elettrica tramite una centrale eolica, mentre in passato l'energia del vento veniva utilizzata immediatamente sul posto come energia motrice per applicazioni industriali e pre-industriali (come, ad esempio, nei mulini a vento). Di fatto è stata la prima forma di energia rinnovabile, assieme a quella idraulica, scoperta dall'uomo dopo il fuoco (si pensi alla vele delle navi) ed una tra quelle a sostegno della cosiddetta economia verde nella società moderna.

L'energia posseduta dal vento non è altro che un particolare aspetto dell'energia solare. I raggi solari riscaldano la superficie terrestre che, a sua volta, cede per convezione una parte del calore ricevuto all'atmosfera sovrastante. L'aria divenuta più leggera tende a salire ed il suo posto viene preso da altra aria più fredda e di conseguenza più pesante. Il Sole, riscaldando in maniera disuniforme e varie zone del pianeta, innesca moti convettivi dovuti alla differenza di densità. Questo fenomeno non è uniforme poiché per la diversità dei luoghi (pianure, deserti, oceani, montagne) e per la loro maggiore o minore capacità di trattenere o cedere il calore solare ricevuto, vengono a crearsi differenti correnti atmosferiche, ossia i venti, in continuo movimento da un luogo all'altro nel tentativo di raggiungere un equilibrio. Il fenomeno è in realtà più complesso dato che intervengono diversi fattori come la rotazione della Terra, l'alternanza di oceani e continenti, le aree cicloniche e anticicloniche che danno origine a fasce di venti prevalenti e costanti ecc...

L'elettricità viene prodotta per mezzo di un aerogeneratore accoppiato a una turbina che in genere viene posta su un asse e messa in rotazione da delle pale. Per assicurare un rendimento ottimale, le turbine eoliche vengono installate di preferenza sui

rilievi collinari e montuosi, o comunque in luoghi che garantiscano adeguate condizioni di vento, ma possono essere collocati anche in mare aperto (il cosiddetto eolico off-shore). Normalmente gli aerogeneratori vengono posti a gruppi (si parla in questi casi di “parchi eolici”), così da sfruttare aree dalle condizioni particolarmente favorevoli e costituire nuclei apprezzabili di produzione elettrica da collegare alla rete di distribuzione. Rispetto all'energia derivata da combustibili fossili, l'energia eolica presenta vantaggi rilevanti: è rinnovabile, abbondante e non produce gas serra.

### 2.1.1 LA STORIA

La prima forma di sfruttamento dell'energia eolica in energia meccanica si ha sin dall'antichità nella propulsione navale con l'utilizzo nelle vele delle navi sprovviste all'epoca dei moderni motori a scoppio.

Riguardo lo sfruttamento dell'energia eolica come elemento fondamentale di un macchinario rotante, le prime fonti parlano di un mulino persiano risalente addirittura 644 a.C. ma si suppone che Cinesi ed Egiziani abbiano utilizzato molto prima il vento, per la macinatura e il pompaggio (sembra verso il 3600 a.C.). Si trattava di "panemones", rotori ad asse verticale forniti di velature, che verso la fine dell'anno 1000 hanno avuto un grosso sviluppo. I primi mulini a vento europei invece trasportavano acqua o muovevano le macine per tritare i cereali, in particolare in Olanda erano utilizzati per pompare l'acqua dei polder (che sono delle parti di terra sotto il livello del mare), migliorando notevolmente il drenaggio dopo la costruzione delle dighe.



*Fig. 2.1.1: Un tipico mulino a vento nei Paesi Bassi*



I mulini olandesi (Fig. 2.1.1) erano i più grandi del tempo, divennero e rimasero il simbolo della nazione. Questi mulini erano formati da telai in legno sui quali era fissata la tela che formava così delle vele spinte in rotazione dal vento. Nel corso del XIX secolo entrarono in funzione migliaia di mulini a vento anche nel resto d'Europa, e poi in America, soprattutto per scopi di irrigazione. In seguito, con l'invenzione delle macchine a vapore, vennero abbandonati per il costo del carbone, allora a buon mercato.

Solo verso il 1890 sono stati realizzati anche i primi generatori elettrici eolici. In URSS numerose macchine di grandi dimensioni furono costruite tra il 1930 e il 1955. A partire dagli anni '30, nei paesi industrializzati, oltre 300 società si misero a costruire generatori eolici sfruttando le ultime scoperte dell'aerodinamica.

Nel dopoguerra, con l'impiego del petrolio a buon mercato nella produzione elettrica, questa industria scomparve quasi completamente, a parte alcuni modelli standard usati per alimentare fari, radiotrasmittenti o fattorie isolate. Tuttavia a partire dalla metà degli anni Settanta si è ricominciato a guardare con crescente interesse all'energia eolica in vista di un suo possibile utilizzo, sia pure in un ruolo soltanto integrativo, per la produzione di elettricità. Venendo a tempi più recenti, negli ultimi 10 anni, tale fonte energetica ha conosciuto un rapido sviluppo soprattutto in Europa.

Tra il 2000 e il 2006, la capacità mondiale installata è quadruplicata. Nel 2005 la nuova potenza installata è stata di 11.000 megawatt, nel 2006 di 15.000 e nel 2007 di 20.000 megawatt. Nonostante la crisi economica, il 2008 è stato un anno record per l'energia eolica, con oltre 27.000 megawatt di nuova potenza installata in tutto il mondo. Da allora una grande crescita esponenziale ha portato ad avere già alla fine del 2008 una potenza cumulata totale di oltre 120 gigawatt, producendo elettricità pari ad oltre l'1,5% del fabbisogno mondiale di energia e si prevede che ogni tre anni si possa incrementare di 1 punto percentuale la copertura del fabbisogno mondiale di energia tramite questa fonte di energia.

### 2.1.2 IL POTENZIALE DELL'ENERGIA EOLICA

L'energia eolica non è equamente distribuita sulla Terra, dato che solo le aree ove la velocità media annua del vento è superiore ai 4 m/s sono di interesse per la generazione elettrica. Amplicissimi territori al centro dei continenti non sono idonei per questo uso avendo velocità medie dei venti inferiori al valore predetto. Al riguardo è però da dire che la maggior parte dei paesi industrializzati ha ormai censito i siti adeguati allo sfruttamento energetico del vento.

Il potenziale eolico mondiale è pari, secondo l'ipotesi più pessimista, a circa 20.000 TWh (1 TWh è pari ad un miliardo di kWh) valore da confrontare con il fabbisogno elettrico mondiale pari a circa 15.000 TWh; in pratica il potenziale energetico disponibile è teoricamente superiore all'intero fabbisogno energetico. Tale potenzialità può essere sfruttata con aerogeneratori connessi alla rete sia in forma isolata che in installazioni multiple (wind-farms); un'ulteriore possibilità di sfruttamento deriva dagli impianti fuori costa (off-shore): i sistemi eolici hanno una ottimale collocazione in mare aperto dove ci siano fondali poco profondi, questo sia per un minor impatto ambientale-paesaggistico che per una migliore qualità e costanza del vento.

L'energia eolica è inoltre molto utile in quelle regioni non servite da reti elettriche come, ad esempio, molti paesi in via di sviluppo. Esistono infatti sul mercato numerosi modelli di piccoli aerogeneratori che potrebbero risolvere i problemi di approvvigionamento energetico di molte aree remote del globo. In questi casi tuttavia la natura intermittente della sorgente richiede sistemi di accumulo dell'energia che presentano ancora notevoli margini di miglioramento tecnico e costi elevati; la soluzione migliore può quindi essere quella di associare agli impianti equipaggiamenti in grado di garantire la continuità del servizio realizzando così quello che è comunemente definito un sistema ibrido. La più generale configurazione di un sistema ibrido comprende una o più unità a configurazione rinnovabile (ad esempio un generatore eolico), una o più unità di generazione convenzionale (diesel), un sistema di accumulo (meccanico, elettrochimico, idraulico), sistemi di condizionamento della potenza (inverter, raddrizzatori, regolatori di carica) ed infine un sistema di regolazione e controllo. Se la risorsa eolica è sufficientemente presente, l'utilizzazione di aerogeneratori di piccola taglia risulta particolarmente conveniente in questi tipi di impianti, in quanto, a parità di energia prodotta, richiede costi di investimento relativamente limitati.

### 2.1.3 FUNZIONAMENTO E TIPOLOGI COSTRUTTIVE

L'energia del vento deriva dalla sua velocità. Per catturarla bisogna quindi rallentare la massa d'aria che attraversa l'elica trasformando le forze agenti sulle pale in potenza di rotazione. Per fare ciò le pale si presentano oblique rispetto al vento, con un angolo definito "angolo di calettamento", provocando così la rotazione.

Sommariamente le macchine eoliche si suddividono in quattro categorie, secondo l'asse di rotazione (orizzontale o verticale) e la velocità: lenta (la velocità delle pale resta dello stesso ordine di grandezza di quella del vento) o rapida (nel qual caso la velocità dell'estremità delle pale può raggiungere facilmente una velocità dieci volte superiore a quella del vento).

Riguardo le macchine eoliche lente le più conosciute sono le ruote di pompaggio multipale grazie alle quali, essendo possibile ottenere una forte coppia di avvio, si può far funzionare una pompa. La potenza raccolta resta comunque molto bassa e solo con versioni più elaborate è possibile la produzione energetica.

Le macchine eoliche rapide, che utilizzano due o tre pale sottili, sono invece destinate alla produzione di elettricità dato che queste riescono a catturare l'energia disponibile con un buon rendimento che raggiunge circa il 70% del limite teorico. Le pale presentano la forma di ala di aeroplano al fine di ridurre le perdite e la portanza del profilo assicura la coppia di rotazione.

In base alla disposizione dell'asse del rotore rispetto alla direzione del vento gli aerogeneratori possono essere classificati in:

- macchine ad asse orizzontale, nelle quali la direzione del vento è parallela all'asse del rotore;
- macchine ad asse verticale, nelle quali l'asse del rotore è perpendicolare al terreno ed alla direzione del vento.

Lo sfruttamento della fonte eolica su scala significativa, che comporta la realizzazione di centrali con numerosi aerogeneratori, è condizionato dalla soluzione di diversi problemi di tipo ambientale e tecnico. Dal punto di vista ambientale gli aspetti da considerare sono molti. Esiste infatti, in primis, il problema del territorio interessato dovuto al numero e alle dimensioni delle macchine da installare ed aggravato dal fatto che le varie unità devono essere opportunamente distanziate per limitare la reciproca interferenza aerodinamica (la densità di potenza che può essere installata va da 5 a 8 MW/km<sup>2</sup>).

È però da osservare, che le strutture di una centrale eolica occupano solo l'1% del totale della superficie interessata, quindi, la parte rimanente, può restare adibita ad altri usi come il pascolo o l'agricoltura.

In particolare gli aerogeneratori occupano circa lo 0,2% del terreno mentre il rimanente 0,8% è occupato dalle strade di collegamento e dalle aree di servizio occupazione del

suolo di una centrale eolica.

Nel seguito verranno enunciati alcuni delle principali tipologie costruttive di sistemi eolici per la produzione di energia elettrica (per quel che riguarda nello specifico le turbine ad asse verticale e orizzontale si rimanda ai paragrafi successivi dedicati):

- Microeolico e minieolico (Figmmmm):

Si tratta di impianti di piccola taglia, adatti ad un uso domestico o per integrare il consumo elettrico di piccole attività economiche.

Di solito questi impianti sono costituiti da aerogeneratori del tipo ad asse orizzontale con diametro del rotore da 3 a 20 metri e altezza del mozzo da 10 a 20 metri. Solitamente per minieolico si intendono impianti con una potenza nominale fra 20 kW e 200 kW, mentre per microeolico si intendono impianti con potenze nominali inferiori ai 20 kW. Per questi impianti di piccole dimensioni il prezzo di installazione risulta più elevato, attestandosi attorno ai 1500-3000 euro per kW installato, in quanto il mercato di questo tipo di impianti è ancora poco sviluppato; tra le cause, le normative che, a differenza degli impianti fotovoltaici, in quasi tutta Europa non ne sostengono la diffusione. Questi impianti possono sfruttare le specifiche condizioni del sito in cui si realizza l'installazione. Sono impianti adattabili, che riescono a sfruttare sia venti deboli che forti e che riescono ad intercettare le raffiche improvvise tipiche dell'Appennino.

Per la valutazione dell'idoneità del luogo non si effettua solitamente una campagna di misure in sito (come avviene per installazioni medio-grandi), per l'elevata incidenza che tale costo potrebbe avere sull'investimento globale.

La valutazione, nel caso si ritenga sufficiente la disponibilità di vento (come velocità e continuità), deve considerare altri fattori quali:

- l'interferenza con altre strutture (edifici o altre turbine eoliche)
- l'inquinamento acustico
- la semplicità di installazione
- la lunghezza del percorso elettrico (costi interrimento e dispersioni d'energia)
- esigenze di sicurezza ed incolumità fisica
- eventuali vincoli ecologici (presenza di specie protette) o storico-archeologici

Per impianti di piccola taglia esistono varie soluzioni tecniche, alternative ai classici generatori a uno due o tre pale ad asse orizzontale, in grado di sfruttare l'energia eolica:

- Generatore a turbina multipla (Fig. 2.1.2): ha un rotore piccolo (diametro medio circa 1.5 - 3 metri) costituito da un alto numero di pale in lamiera metallica, generalmente 18 o più, disposte a raggiera. È simile a una grande ventola e viene solitamente usato sfruttando direttamente l'energia

meccanica dell'albero (ad esempio per il pompaggio di acqua dai pozzi), tramite un opportuno cinematismo che riporta il moto alla base della torre. Ha una coppia molto alta anche a basso numero di giri; è sufficiente un vento debole per far lavorare il rotore in condizioni ottimali. Se usato per micro-generazione elettrica, il rotore ha un numero inferiore di pale sagomate.



*Fig.2.1.2: Esempio di generatore eolico a turbina multipla*

- Aerogeneratori di piccola taglia ad asse verticale (Fig. 2.1.3): Si tratta di una soluzione che negli ultimi anni ha risvegliato l'interesse di aziende e ricercatori, in quanto permette costanza di funzionamento indipendentemente dalla direzione del vento e migliore resistenza anche con vento ad alte velocità e turbolenza.



*Fig.2.1.3: Un esempio classico di turbina microeolica ad asse verticale*

Alcuni esempi di soluzioni costruttive di recente realizzazione, tutti ad asse verticale e per potenze nell'ordine delle decine di kW:

- rotore Windside: ha forma elicoidale, e permette buoni rendimenti.
- turbina Darrieus: il rotore può avere forma "a fuso", ad "H", ad "A".
- turbina "Kobold": derivata da una variante delle turbine Darrieus, è un sistema a pale mobili in grado di minimizzare la resistenza nella fase passiva.
- Turbina Savonius: ha pale ad "S", in pratica costituito due gusci semicilindrici incernierati ad un asse verticale.
- Aerogeneratore W.M.: dotato di semipale mobili che si aprono nella fase passiva e si presentano chiuse nella fase attiva.

- Impianti eolici off-shore (Fig. 2.1.4):

Con l'espressione "eolico off-shore" si intendono gli impianti installati ad alcune miglia dalla costa di mari o laghi, per meglio utilizzare la forte esposizione alle correnti di queste zone. Esistono anche le turbine offshore flottanti che possono essere installate anche nei siti marini molto profondi. Imitando la tecnologia delle piattaforme petrolifere, le turbine eoliche galleggianti vengono installate in mare aperto e sfruttano i venti costieri. Il progetto usa un sistema di ancoraggio a tre punti (cavi in acciaio ancorati al fondale), simile a quello utilizzato nelle piattaforme petrolifere.



Fig. 2.1.4: Impianto eolico off-shore da 40 MW nello stretto di Oresund al largo di Copenaghen

La Hydro, società norvegese che opera nel settore energia, ha collocato un prototipo di questa turbina vicino Karmøy, isola a sud est della Norvegia ed

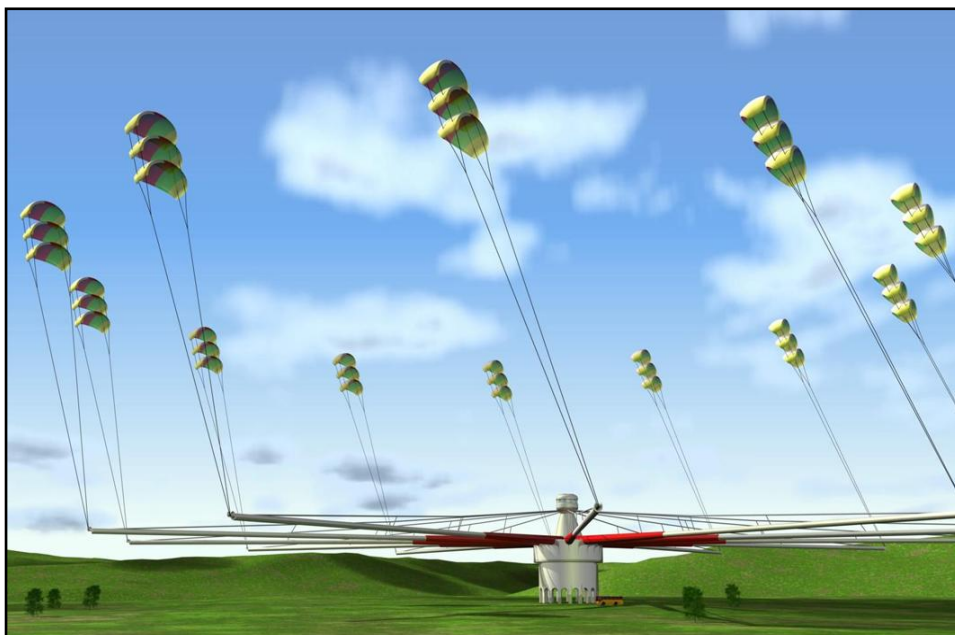


eventualmente vicino ad una installazione petrolifera con l'obiettivo di rifornirla di energia rinnovabile.

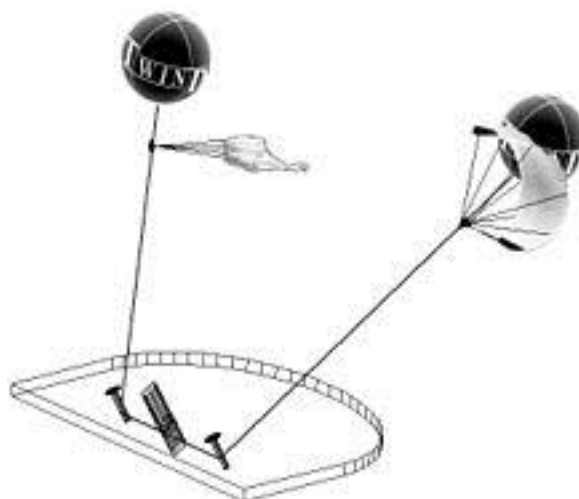
- Eolico d'alta quota:

Proposte innovative prevedono la realizzazione del cosiddetto eolico d'alta quota, che sfrutta i venti di alta quota. Tra i progetti attualmente allo studio o in fase di realizzazione troviamo il Kite Wind Generator (Fig. 2.1.5) che prevede due filoni principali di progetto: il KiteGen Stem ed il KiteGen Carousel) il cui funzionamento si ispira a quello del kitesurfing. Questo sistema elimina i problemi statici e dinamici che impediscono l'aumento della potenza (cioè delle dimensioni) ottenibile dagli aerogeneratori tradizionali. Il problema di "catturare" il vento è risolto dall'idea di impiegare profili alari di potenza (Power Kites): nel Kitegen Stem, questi profili alari sono collegati tramite cavi ad una o più coppie di motori/generatori, che servono anche per il controllo dell'ala; il funzionamento prevede due fasi, in cui il profilo alare sale e scende in volo. Durante la fase ascendente, il profilo alare esercita trazione sui cavi, che trasferiscono il moto ai generatori: è la fase "attiva" durante la quale si produce energia; durante la fase discendente, i generatori vengono sfruttati come motori per il recupero dei cavi e dell'ala (utilizzando circa il 5% dell'energia prodotta durante la precedente fase "attiva"). Nell'agosto 2006 è stato costruito un primo prototipo dal nome Mobilegen (di piccole dimensioni, trasportabile con un normale mezzo commerciale), che è già stato in grado di generare un picco di 80 kW di energia elettrica. Attualmente, è in fase di realizzazione a Sommariva Perno (CN) il primo prototipo "industriale" di pre-serie, per il quale si prevede una produzione iniziale di 1 MW, per passare infine a 3 MW, quando questa tecnologia esprimerà tutto il potenziale previsto. Nel KiteGen Carousel, invece, i kites sono solidali al perimetro della turbina.

I profili alari di potenza volano secondo traiettorie prestabilite, che permettono di trasformare la forza esercitata sui cavi in una coppia complessiva concorde che mette in rotazione le braccia di una giostra ad asse verticale. In pratica, i profili alari di potenza sono le pale della turbina, che le consentono di ruotare intorno ad un asse verticale, semplificando enormemente i problemi di fondazione e di rigidità.



*Fig.2.1.5: Kite-Gen*



*Fig. 2.1.6: Esempio di Twind Technology*

- Twind Technology.

La Twind Technology (Fig. 2.1.6) si basa sull'utilizzo di una coppia di palloni aerostatici che stazionano a quote superiori agli 800 metri e frenati a terra da cavi che fungono anche da elemento di trasmissione del moto. Quando un pallone viene trascinato orizzontalmente dalla forza del vento che spinge sulla superficie della sua vela aperta, l'altro pallone, a vela chiusa, viene riportato sulla verticale della piattaforma trainato dallo stesso cavo collegato al primo pallone. Al termine dello srotolamento del cavo, giunto a fine corsa, un meccanismo automatico opera la chiusura delle ali a vela del primo pallone e opera l'apertura delle ali a vela del secondo; in questo modo le funzioni dei due palloni si invertono replicando la

stessa dinamica. Questa tecnologia permette di ottenere energia mediante il continuo movimento alternativo del cavo agganciato a due palloni aerostatici.

#### **2.1.4 COSTI**

Il costo di installazione si aggira attorno agli 1,5 euro per watt (per confronto, un impianto fotovoltaico ha un costo di circa 5 euro per watt). Per le turbine negli anni passati ci sono stati aumenti dei costi a causa dell'aumento del prezzo delle materie prime, ossia dei materiali ferrosi di cui sono composte. Nel 2008 il costo in terraferma era di 1,38 euro per watt, con un aumento del 74% relativo ai tre anni precedenti. Off shore il costo era di 2,23 euro, con un incremento del 48% rispetto ai tre anni precedenti. Tuttavia oggi nel mondo e particolarmente negli Stati Uniti il costo delle turbine sta diminuendo velocemente per vari motivi tra cui la forte competizione del settore. Oggi si è arrivati nel secondo semestre del 2010 a prezzi medi per grandi commesse inferiori a 1 euro per watt. Dopo anni in cui il costo è salito, adesso (2011/2012) siamo in presenza di prezzi calanti.

Il costo di installazione in Italia, facendo riferimento ad impianti con una potenza nominale superiore ai 600 kilowatt, varia tra i 1,5 e i 2 euro per watt; il prezzo varia secondo la complessità dell'orografia del terreno in cui l'impianto è installato, della classe di macchina installata, della difficoltà di connessione alla rete elettrica.

Gli unici capitoli di spesa totale riguardano l'installazione e la manutenzione, dato che non ci sono costi di approvvigionamento della fonte produttrice di energia. In relazione alla superficie occupata, una centrale eolica non toglie la possibilità di continuare le precedenti attività su quel terreno (pastorizia, colture, ecc.).

#### **2.1.5 DIFFUSIONE**

Alla fine del 2009, la capacità di generazione mondiale degli aerogeneratori era di 157,9 gigawatt pari a circa il 2% dell'elettricità consumata nel mondo e sta crescendo rapidamente, notandosi un raddoppio nei tre anni tra il 2005 e il 2008 (Si valuti a tal riguardo la tendenza Europea nelle Fig. 2.1.7, Fig. 2.1.9).

CUMULATIVE WIND POWER INSTALLATIONS IN THE EU IN MW

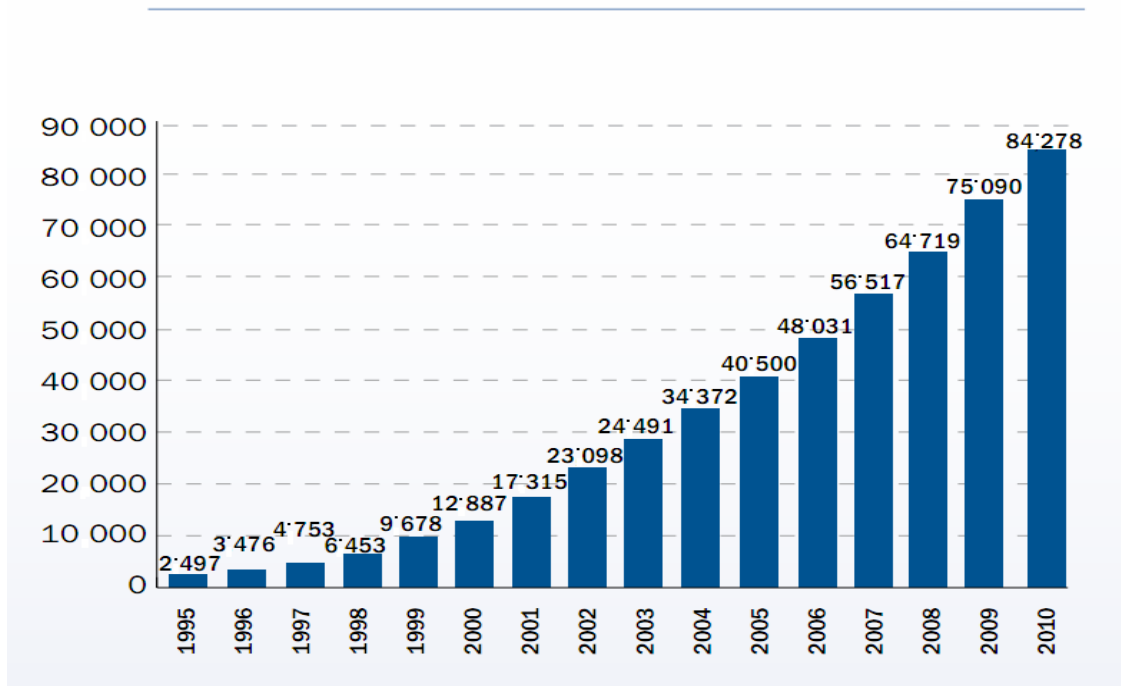


Fig.2.1.7: Crescita dell'eolico in Europa (espressa in MegaWatt) negli ultimi 15 anni

Alcuni paesi hanno raggiunto un coefficiente di penetrazione della potenza eolica molto elevato (a volte con incentivi governativi).

La situazione dell'eolico in Europa (Fig. 2.1.8) vede una capacità di 84074 megawatt (dati relativi alla fine del 2010) concentrati maggiormente in Germania (27214 megawatt), Spagna (20676 megawatt), Francia (5660 megawatt), Regno Unito (5204 megawatt).

EU MEMBER STATE MARKET SHARES FOR TOTAL INSTALLED CAPACITY AT END 2010. TOTAL 84'074 MW

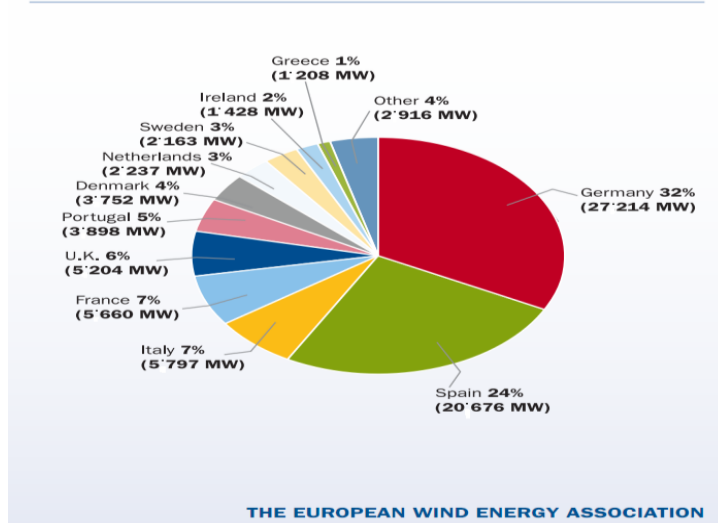


Fig.2.1.8: Eolico in Europa

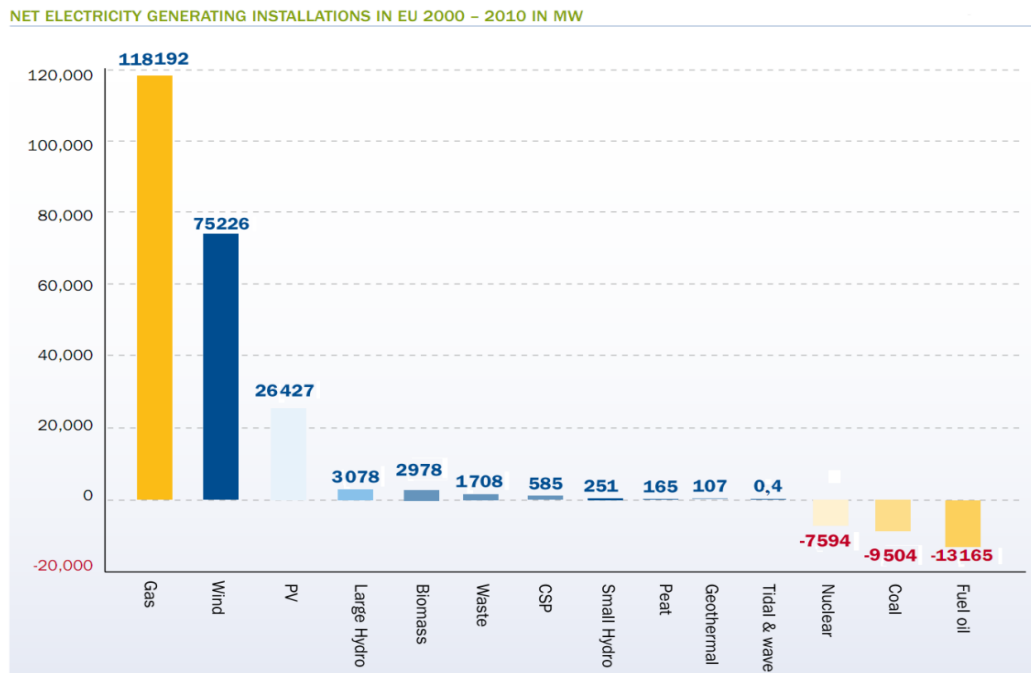


Fig.2.1.9: Tendenza europea negli ultimi 10 anni (espressa in MegaWatt) nei confronti dello sviluppo o dismissione delle centrali elettriche di un certo tipo a favore di un altro, si evidenzia un ampliamento (valori positivi) di impianti funzionanti a gas naturale, eolici e fotovoltaici, e una maggior tendenza alla chiusura (valori negativi) di quelli ad olii combustibili, nucleari e a carbone

Per quel che riguarda il resto del mondo, gli Stati Uniti d'America hanno portato la nuova potenza installata nel 2008 a oltre 8300 megawatt.

La Cina ha quasi raddoppiato rispetto al 2007 la nuova potenza installata, passando dai 3600 megawatt ai 6300 del 2008, consentendole di superare l'India. L'India si avvicina ai 10000 megawatt; nel 2008 ha installato 1800 megawatt in linea il 2007, quando ne aveva installati 1700.

Gli USA, la Germania, la Spagna, la Cina e l'India da sole rappresentano oltre il 70% della potenza eolica mondiale.

Per quel che riguarda il panorama italiano la potenza eolica totale installata nel 2010 era di 5797 megawatt pari al 7% dell'energia eolica prodotta in Europa.

La risorsa vento non è distribuita omogeneamente in Italia, ma si concentra in alcune zone montuose dell'Appennino. Il fattore di capacità, variabile nei luoghi, nel tempo e per classe di aerogeneratore risulta difficile da valutare e la localizzazione degli impianti richiede uno studio molto accurato con torri dotate di anemometri disposti a varie altezze così l'energia eolica è pensata tenendo presente sia una produzione centralizzata in impianti da porre in luoghi alti e ventilati, sia un eventuale decentramento energetico, per il quale ogni comune italiano ha impianti di piccola taglia, composti da un numero esiguo di pale (1-3 turbine da 3 o 4 megawatt) con le quali genera in loco l'energia

consumata dai suoi abitanti. Tuttavia, la mancanza di una legge quadro o di un testo unico sulle energie eoliche, diversamente dall'energia solare, è considerata una delle cause della lenta diffusione della tecnologia eolica in Italia rispetto all'estero.

## **2.2 VALUTAZIONI**

### **2.2.1 CARATTERISTICHE POSITIVE**

Il vento è una fonte di energia rinnovabile e sostenibile, a basso impatto ambientale rispetto ad altre fonti energetiche. Non viene prodotta l'anidride carbonica, se non in quantità minime in rapporto alla costruzione dell'impianto.

Le dimensioni dei parchi eolici sono facilmente scalabili nella potenza e particolarmente adatte a soddisfare la domanda di piccole città o province poco popolate.

Non si verifica una variabilità dei costi dovuta ad aumenti del prezzo del combustibile. Una volta determinato il costo di costruzione dell'impianto risulta fattibile determinare i tempi di ammortamento (un grosso impianto elettrico comincerà a pagarsi soltanto finita la costruzione, dopo circa 6-10 anni, accumulando interessi del 24-50% rispetto all'investimento iniziale). I costi di mantenimento sono relativamente bassi, molti componenti sono riciclabili e riutilizzabili.

Esiste un ampio margine di miglioramento nei costi (razionalizzazione dei processi produttivi), nella trasformazione della potenza meccanica in corrente elettrica (gestione elettronica della trasformazione) e nell'immagazzinamento della corrente (utilizzo di nuovi tipi di batterie più efficienti, di serbatoi d'acqua sopraelevati e di generatori "mini-hydro" ad alta efficienza).

Nel Texas (e in altri stati degli USA), l'eolico si è dimostrato una fonte di reddito ulteriore per allevamenti e colture in difficoltà economica, permettendo la sopravvivenza di agricoltori che ricevendo un reddito fisso mensile dalle società elettro-eoliche (come canone per l'utilizzo del relativamente piccolo spazio occupato al suolo) possono alleviare problemi quali la variabilità del prezzo di vendita dei prodotti agricoli e la perdita dei raccolti.

### **2.2.2 CARATTERISTICHE NEGATIVE**

Per motivi efficienza ma anche di sicurezza, i generatori eolici possono operare solo in particolari condizioni di vento, l'energia eolica viene prodotta a intermittenza e perciò non è programmabile. Tale situazione fa sì che il settore eolico non possa sostituire completamente fonti tradizionali quali i combustibili fossili o l'energia

idroelettrica, per i quali la potenza erogata è costante o direttamente controllabile in base alle esigenze. Tale fonte di energia trova quindi il suo ambito applicativo principalmente nell'integrazione alle reti esistenti affiancata a impianti programmabili per soddisfare la necessità di potenza di picco ad ogni istante durante il giorno. Così come avviene per l'energia fotovoltaica, il problema dell'intermittenza o variabilità aleatoria di tale fonte energetica nelle esigenze energetiche a livello locale può essere superato in linea teorica con una produzione ampiamente distribuita e sovradimensionata e con l'appoggio a sistemi di distribuzione elettrica automatizzati e a larga scala (le cosiddette smart grid) cioè sistemi di distribuzione in grado di smaltire i flussi di energia intermittenti che altrimenti genererebbero sovraccarichi e improvvisi cali di tensioni con ripercussioni sulla produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia stessa.

Sulla terraferma, i luoghi più ventosi e quindi più adatti alle installazioni eoliche sono generalmente le cime, i crinali di colline e montagne o le coste. Gli impianti moderni, sebbene siano anche esteticamente apprezzabili, per le loro grandi dimensioni risultano visibili da grande distanza e possono causare un turbamento del paesaggio.

Esiste il rischio di mortalità da impatto per gli uccelli migratori, in particolare per gli impianti più grandi. È stato comunque rilevato una mortalità molto inferiore a quella normalmente causata dalle finestre degli edifici e dalle automobili.

Il rumore di una turbina eolica, soprattutto in quelle ad asse orizzontale, dovuto essenzialmente al vento incidente sulle pale, secondo alcuni studi favorirebbe, nei residenti di abitazioni nelle immediate vicinanze, la cosiddetta "sindrome da pala eolica", un insieme di disturbi a sfondo neurologico in più le autorità preposte al controllo del traffico aereo di alcuni paesi sostengono che gli impianti possono interferire con l'attività dei radar, sia perché l'elevata RCS (Radar Cross Section) delle torri produrrebbe un'eco radar difficile da eliminare, sia perché le pale in continua rotazione potrebbero essere scambiate per velivoli in movimento. Costituiscono un pericolo anche per piloti che si affidino a sistemi di visione notturna (a infrarossi o a intensificatori di luce).



### 2.3 TURBINE AD ASSE ORIZZONTALE

Nel 1888 il visionario Charles Brush realizzò negli Stati Uniti uno dei primi tentativi di generare elettricità sfruttando una turbina ad asse orizzontale. Nella sua turbina (Fig. 2.3.1) l'aria colpiva un gran numero di pale che perciò era costretta a deviare, generando una rotazione di tutta la ruota. Questo tipo di rotore è uguale in tutto e per tutto alle turbine multipala dei ranch americani, solo che quest'ultime erano usate solo per pompare acqua.

Questo tipo di sistema è basato sulla resistenza offerta dalle pale, quindi ha una velocità di rotazione molto bassa ed una coppia molto elevata.

L'utilizzo di questi rotorii è stato oramai abbandonato privilegiando rotorii più veloci che sfruttano la coppia prodotta dalla portanza e non dalla resistenza.

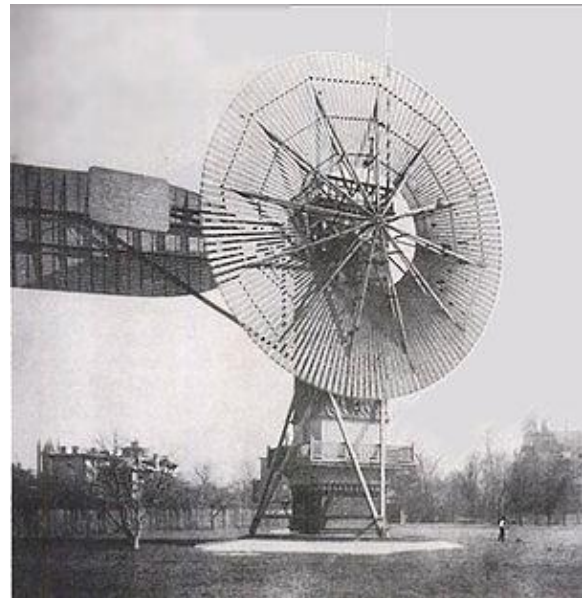


Fig. 2.3.1 Turbina di Charles Brush

Proprio come accade in campo nautico dove prevalgono le zone in cui la navigazione avviene per portanza e non per resistenza (Fig. 2.3.2), anche nel settore eolico è vantaggioso prediligere la forza di portanza dato che nella maggior parte delle configurazioni in cui una pala si trova a lavorare tale forza risulta di maggiore entità rispetto alla resistenza.

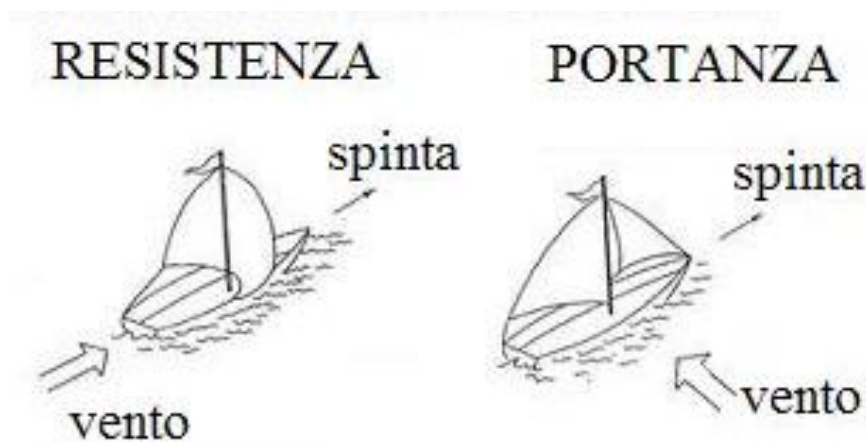


Fig. 2.3.2: Esempi di navigazione per portanza e resistenza

In questo modo si viene ad avere così un rotore con una grande velocità angolare e una coppia di modesta entità, quindi un meccanismo che tutto sommato riesce a produrre maggior potenza. Questo sistema si adatta bene per la produzione di energia ma non per applicazioni di pompaggio dell'acqua o macinazione del grano, inoltre la bassa coppia genererà una turbolenza fluidodinamica a valle del rotore di minor entità.

Le moderne turbine eoliche ad asse orizzontali basate su portanza si rifanno al modello introdotto da Marcellus Jacobs la cui macchina prevedeva anche un timone direzionale che orientava il rotore al vento. Durante tutto il secolo scorso questo tipo di aerogeneratori ha continuato ad evolversi fino a diventare un modello molto avanzato e di dimensioni sempre maggiori.

Tutti i generatori eolici ad asse orizzontale sono caratterizzati da elementi comuni: sono costituiti da una torre di sostegno, un rotore (che è l'insieme delle pale, del mozzo, dell'albero e parte del meccanismo di controllo del passo) e da una navicella (gondola) in cui sono contenuti il generatore, il moltiplicatore di giri (assente nel caso di generatori sincroni), i freni, il sistema di controllo (che deve azionare i freni meccanici in caso di sovraccarico, guasto o per manutenzione), gli attuatori del "pitch control" (controllo del passo) e dello "yaw control" (controllo dell'imbardata).

L'angolo di "pitch", o angolo di calettamento, è l'angolo che assume la pala rispetto all'asse di rotazione del rotore, tramite una sua variazione è possibile regolare l'incidenza del vento sulla pala e di conseguenza effettuare una regolazione attiva della macchina.

L'angolo di "yaw" è l'angolo di rotazione della navicella sulla propria torre di sostegno; dal momento che la macchina deve sempre essere allineata rispetto al vento, un sistema di movimentazione attivo, formato da attuatori elettrici provvede a movimentare la navicella a seconda della direzione del vento registrata da un apposito strumento (indicatore di direzione, simile a una banderuola) posto nella parte posteriore della navicella stessa. Nel caso di macchine di piccola potenza la variazione dell'angolo di "pitch" è assente, mentre quella dell'angolo di "yaw" al posto di essere effettuata da meccanismi elettroattuati viene garantita da un timone (Fig. 2.3.3) che meccanicamente senza elettricità orienta la navicella.

La torre di sostegno oltre a sostenere il rotore, ha il compito di assorbire le vibrazioni provenienti dalla navicella evitando che le stesse vadano a scaricarsi eccessivamente sul basamento e sulle fondazioni.



Fig. 2.3.3: Micro turbina eolica ad asse orizzontale con timone per la regolazione dell'angolo di "yaw"

La tendenza attuale è quella di realizzare la torre di sostegno in acciaio laminato, a sezione tubolare con elementi componibili di forma tronco-conica che va riducendosi verso l'alto collegati mediante flange o incastri; in tal modo si riescano a smorzare le sollecitazioni provenienti dalla navicella, con notevoli vantaggi nella realizzazione delle fondazioni.

Esistono due modalità di installazione del rotore (Fig. 2.3.4): quella sottovento e quella sopravvento.

La prima non ha bisogno di nessun motore elettrico per lo "yaw control" e nessun timone, infatti le pale sono molto flessibili e flettendo creano un cono aerodinamico che allinea la macchina al vento.

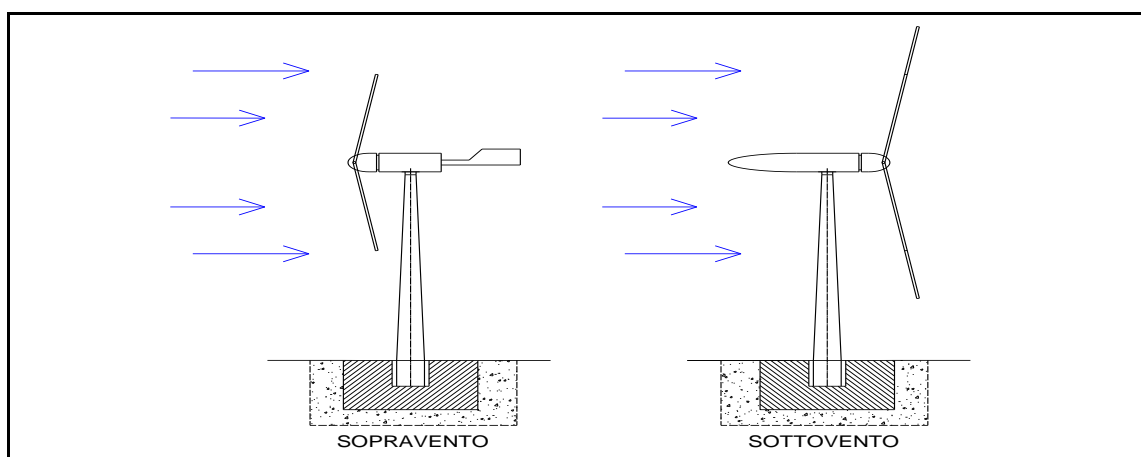


Fig. 2.3.4: Rotore sopravvento e rotore sottovento

Presenta però il grosso problema di generare carichi pulsanti su tutta la struttura facendo sorgere il fenomeno della fatica e poi c'è anche il problema dell'influenza fluidodinamica dalla torre che riduce l'efficienza, ragione per cui in genere si predilige l'installazione sopravento che pur richiedendo pale più rigide, affinché la loro flessione non le porti a impattare contro la torre di sostegno, garantisce maggior efficienza.

Per entrambe le installazioni al crescere della velocità del vento l'angolo di attacco sulle pale aumenta finché al di sopra di una certa velocità, il flusso d'aria inizia a distaccarsi dalla superficie delle pale. Questo fenomeno di stallo si presenta all'inizio in prossimità del mozzo e poi si estende verso l'estremità della pala all'aumentare della velocità del vento fornendo un meccanismo automatico di regolazione della potenza.

Attualmente il numero di pale può variare da un minimo di una a un massimo di tre pale con le seguenti differenze:

- Rotori tripala (Fig. 2.3.5): con tre pale montate a  $120^\circ$  l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico tra 30 e 60 giri/minuto, è la configurazione più usata perché, se pur a fronte di costi di trasporto e di costruzione maggiori, è quella caratterizzata dalla miglior efficienza;

-



*Fig. 2.3.5: Rotori tripala*

- Rotori bipala (Fig. 2.3.6): con due pale montate a  $180^\circ$  l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico tra 40 e 70 giri/minuti (quindi superiore rispetto al caso precedente). Ha un costo minore dei tripala ma anche un'efficienza minore risentendo maggiormente della presenza della torre e della variazione di velocità con la quota;



Fig. 2.3.6: Rotore bipala

- Rotore monopala (Fig. 2.3.7): presenta una sola pala munita di apposito contrappeso, è la soluzione meno costosa, di aspetto poco gradevole e più rumorosa in quanto è la più veloce tra i tre modelli esaminati; risulta indicata nel caso di siti poco accessibili; dato che l'efficienza è minore delle due viste sopra.



Fig. 2.3.7: Rotori monopala

Nella maggior parte dei casi i generatori eolici ad asse orizzontale di grossa taglia (650-1000 kW) vengono impiegati per la produzione energia elettrica in centrali eoliche chiamate *wind farm* che possono sorgere sia sulla terraferma (*on-shore*) che in mare aperto (*off-shore*) (Fig. 2.3.8).



*Fig.2.3.8:Parco eolico off-shore e on-shore*

## **2.4 TURBINE AD ASSE VERTICALE**

Un generatore eolico ad asse verticale è un tipo di macchina eolica contraddistinta da una ridotta quantità di parti mobili nella sua struttura, il che le conferisce un'alta resistenza alle forti raffiche di vento, e la possibilità di sfruttare qualsiasi direzione del vento senza doversi riorientare continuamente. È una macchina molto versatile, adatta all'uso domestico come alla produzione centralizzata di energia elettrica nell'ordine del megawatt.

L'idea di utilizzare delle pale disposte parallelamente all'asse di rotazione che nel loro movimento delimitano una superficie cilindrica, al posto della classica disposizione radiale che descrive un cerchio, non è nata dall'eolico, ma esistono diverse applicazioni che sfruttano tale concetto da diverso tempo; una di queste è da ricondurre a una intuizione di Van Voith che per primo utilizzò delle pale ruotanti secondo la direzione verticale per realizzare un propulsore disposto sul fondo delle imbarcazioni in sostituzione delle classiche eliche (Fig. 2.4.1); in tale sistema le pale utilizzano un passo variabile per realizzare una spinta nella direzione desiderata e migliorare la manovrabilità.





Fig. 2.4.1: Imbarcazione dotata del sistema di propulsione a portanza di Voith

Lo stesso principio utilizzato da Voith potrebbe essere utilizzato in campo aeronautico per generare sia una spinta sia una portanza, questo permetterebbe di realizzare un nuovo modello di aeroplano senza ali e senza le classiche eliche del motore.

Pale verticali, vengono utilizzate anche su turbine idrauliche per la produzione di energia che possono essere fissate sul fondale marino o attaccate a stazioni galleggianti (Fig. 2.4.2).

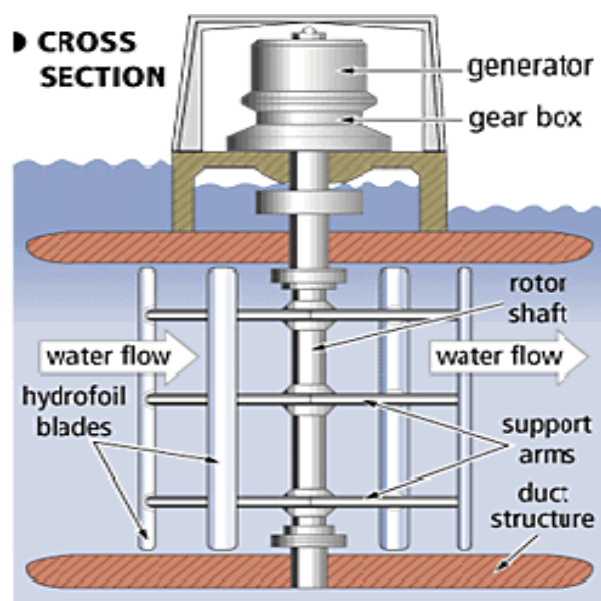


Fig. 2.4.2: Esempio di turbina idraulica ad asse verticale



Nel settore dell'eolico le turbine ad asse verticale possono essere principalmente di tre tipi: le turbine Savonius, il panemone e le turbine Darrieus e verranno discusse nei sottoparagrafi successivi.

### 2.4.1 TURBINA SAVONIUS

Sono turbine a che funzionano unicamente a resistenza, vennero inventate da un ingegnere finlandese Sigurd Savonius da cui ne deriva il nome. La loro realizzazione è molto semplice e prevede due semicilindri fissati a un albero centrale e montati in opposizione (Fig. 2.4.3).



*Fig. 2.4.3: Immagine relativa a una 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 (Fig. 2.4.4). A questo punto il processo si ripete dando luogo ad una rotazione continua.

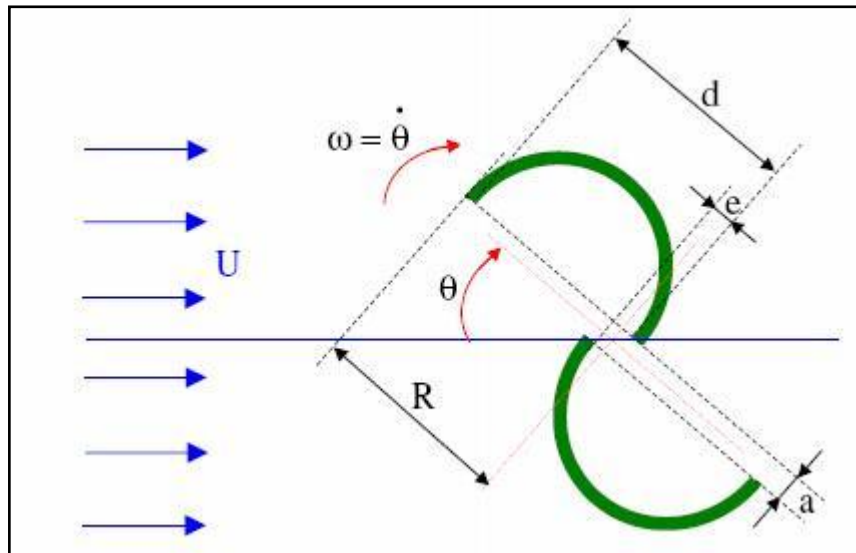


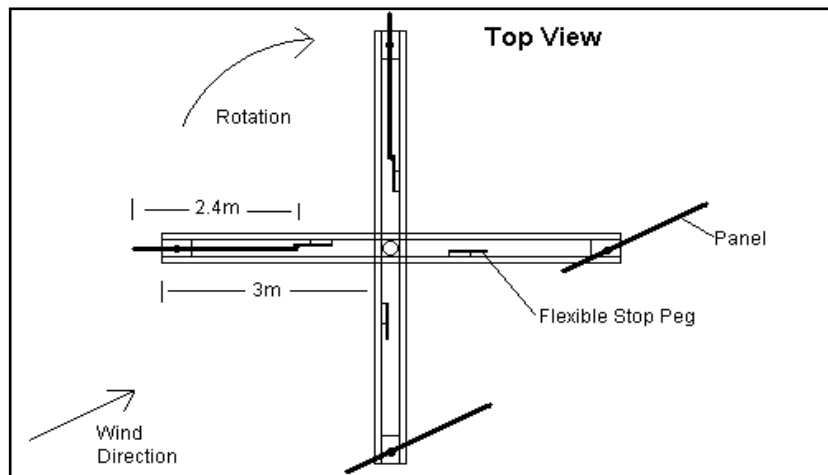
Fig. 2.4.4: Schema di funzionamento di una Savonius

Il principale difetto di tale tipo di macchina, che ne limita le prestazioni, è il fatto di avere in ogni caso un semicilindro che si muove sempre controvento limitando la coppia che può essere prodotta, però come tutte le macchine verticali non ha bisogno di essere orientato continuamente in funzione del vento per funzionare in modo ottimale.

## 2.4.2 IL PANEMONE

Anche il panemone come la turbina Savonius, funziona per resistenza: il vento colpendo ogni pannello lo mantiene a battuta contro un supporto fisso così da generare una coppia che pone in rotazione tutta la struttura (Fig. 2.4.5). 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 il tutto avviene senza l'utilizzo di dispositivi elettronici, ma in modo semplicemente meccanico.



*Fig.2.4.5: Funzionamento del panemone articolato*

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 per generare coppia motrice un pannello piatto, la Savonius utilizzando una forma semicircolare che quindi fornisce una maggiore coppia, quindi se da un lato la Savonius ha l'inconveniente di ridurre la potenza prodotta a causa dei movimenti controvento dall'altro semicilindro, è anche vero che è più efficiente nello sfruttare la vena fluida rispetto a un pannello piatto, quindi le due macchine si equivalgono in termini prestazionali.

### 2.4.3 TURBINA DARRIEUS

Le Turbine Darrieus sono basate sul principio della portanza, brevettate da George Darrieus nel 1931, sono in grado di produrre un'elevata potenza, attualmente riscoperte godono di una crescente diffusione. La tipologia 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 (Fig. 2.4.6).

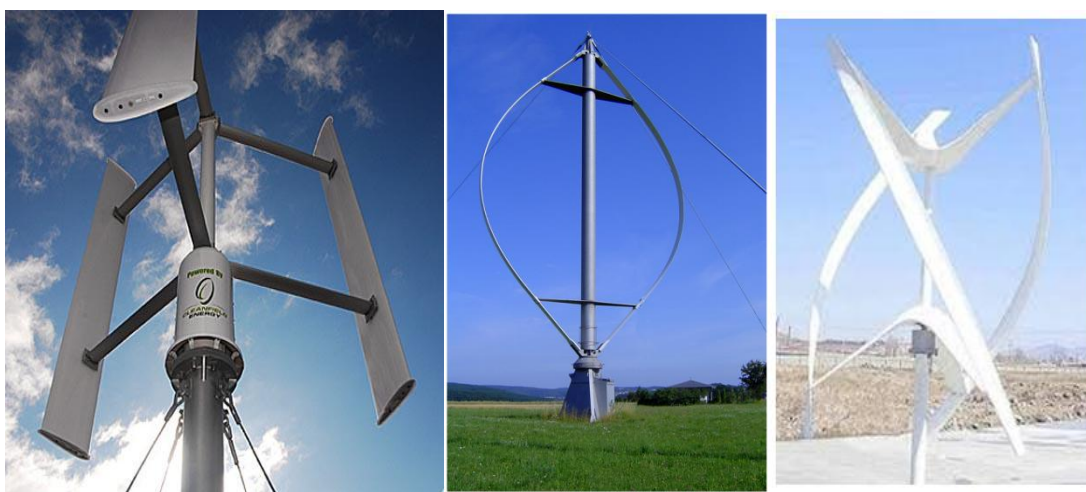


Fig. 2.4.6: Le tre classi di turbine Darrieus, ad H, eggbeater ed elicoidale

Le turbine Darrieus presentano però uno storico difetto: affinché la portanza sia sviluppata sulle pale e che quindi 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 se non aiutata da sistemi elettroattuati. A dire il vero, una turbina con un numero di pale superiore a uno teoricamente 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, esistono così diverse soluzioni, una delle quali consiste nel montare all'interno di una turbina Darrieus esistente una turbina Savonius (Fig. 2.4.7) avente una conformazione tale da creare abbastanza resistenza per poter trascinare le pale della Darrieus fino a quando queste sono in grado di produrre una sufficiente portanza per auto-movimentarsi. Nelle fasi iniziali il movimento della turbina è dato dalla forza resistente che consente le fasi iniziali della rotazione, mentre la portanza non dà nessun contributo perché è assente, all'aumentare della velocità di rotazione la portanza darà sempre maggiore contributo fino al raggiungimento del valore di regime e l'effetto dato dalla resistenza diminuirà. Questo sistema è abbastanza intuitivo e semplice, però necessita comunque di un sistema elettroattuato che consenta a regime il disaccoppiamento tra turbina Darrieus e turbina Savonius, ed in più la presenza delle pale della turbina Savonius comporta un disturbo della vena fluida che comporta l'insorgere di perdite fluidodinamiche rilevanti sul profilo palare della Darrieus.

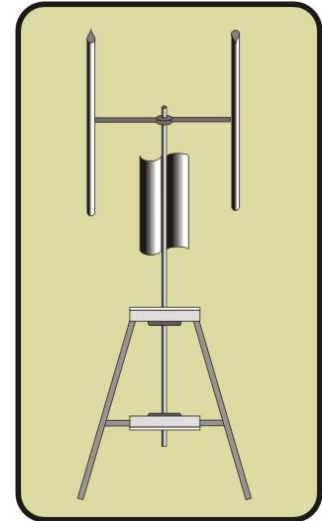


Fig. 2.4.7: Accoppiamento turbine

Un altro sistema per l'avviamento consiste nell'utilizzare motori elettrici per portarsi nella condizione di auto sufficienza; sebbene questo metodo è 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 on shore nelle vicinanze di reti elettriche).

Le forze trainanti delle turbine Darrieus possono essere descritte in dettaglio con l'aiuto della fig. 2.4.8 e della fig. 2.4.9. 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  $\alpha$ .

Le pale che fendono l'aria sotto un certo angolo di attacco sono soggette ad una differenza di pressione che genera così la portanza che spinge in avanti la pala.

Sempre osservando fig. 2.25, 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.

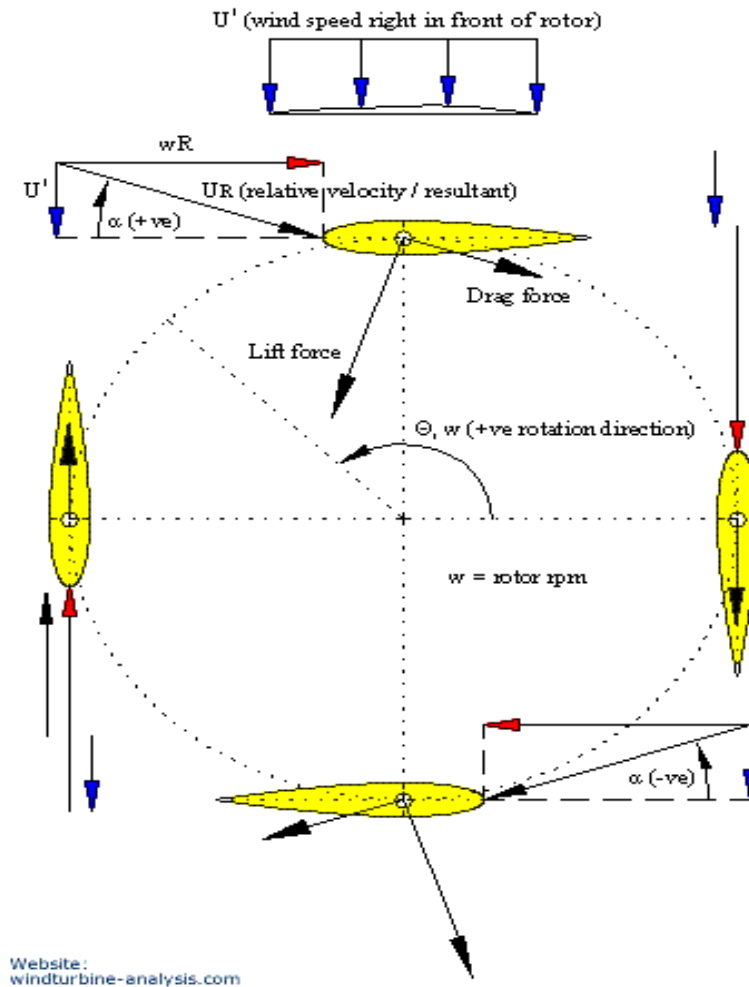
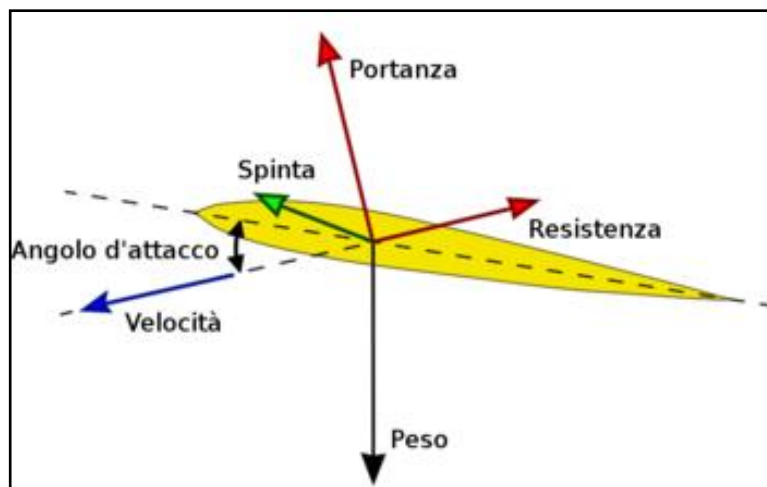


Fig. 2.4.8: Forze agenti sulla turbina Darrieus

*Legenda della figura precedente:*

- freccia rossa: velocità dell'aria che incide sul profilo, dovuta alla sola rotazione del rotore (l'opposto della velocità di trascinamento);
- freccia blu: velocità dell'aria rispetto al terreno (velocità assoluta);
- freccia nera: velocità dell'aria risultante delle due sopra (velocità dell'aria relativa o apparente)
- freccia grigia: forza di resistenza
- freccia verde: forza di portanza



*Fig.2.4.9: Direzione della portanza in funzione dell'angolo d'attacco*

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.



#### **2.4.4 TURBINE VERTICALI E ORIZZONTALI A CONFRONTO**

Rispetto all'eolico ad asse orizzontale le turbine ad asse verticale hanno diversi vantaggi:

- uno dei quali è il fatto di presentare il generatore in basso, vicino al terreno facilitando le operazioni di montaggio, manutenzione e fornendo così una minor probabilità di essere colpite da un fulmine e la loro messa in sicurezza (tramite l'installazione di cavi conduttori, sia sulla superficie della pala sia al suo interno e lungo l'intera macchina fino ad un'opportuna messa a terra) risulta facilitata; la presenza dei fulmini non va trascurata in quanto sono causa di frequenti guasti nelle navicelle delle macchine ad asse orizzontali situate più in alto;
- altro punto a favore dell'asse verticale è una bassa produzione di rumore, infatti le pale si mantengono sempre alla stessa distanza dal palo di sostegno principale evitando che si formi quel cono di rumore tipico delle turbine ad asse orizzontale quando la pala passa vicino alla torre di sostegno;
- Vantaggi fondamentali sono poi la maggior semplicità produttiva e costruttiva delle pale, che comportano minori costi iniziali poiché manca un sistema di orientamento della macchina (infatti le turbine verticali accettano il vento da qualsiasi direzione, al contrario delle turbine ad asse orizzontale che devono essere disposte a favore di vento).

Vi sono anche alcune controindicazioni:

- le pale di una turbina ad asse verticale che si trovano sottovento, per mezzo giro sono costrette a ruotare all'interno di una scia turbolenta prodotta dalle pale precedenti, questo fatto unito alla continua variazione dell'angolo di incidenza durante la rotazione è la causa di una coppia non costante, variabile da valori positivi a negativi, osservazione questa, che porta a non poter trascurare la fatica, preferendo quelle macchine non troppo caricate, che comunque devono essere progettate per una vita finita.

Le turbine ad asse verticale sono state oggetto di molte ricerche in passato, attualmente pur avendo un mercato di nicchia non mancano compagnie che producono aerogeneratori ad asse verticale soprattutto di piccole dimensioni adatte ad un contesto urbano (Fig. 2.4.10).



Fig. 2.4.10: Aerogeneratore ad asse verticale di piccole dimensioni adattato ad un contesto urbano

## 2.5 LIMITE DI BETZ

Per il calcolo della potenza estraibile dalla corrente ventosa, si procederà in primo luogo al calcolo della potenza teoricamente sfruttabile tramite completo arresto della vena (caso ideale). Successivamente si calcolerà il limite relativo alla frazione effettivamente utilizzabile, introducendo e definendo il Limite di Betz.

Per quanto riguarda la potenza posseduta da un fluido in moto e teoricamente sfruttabile si considerino i seguenti parametri:

- velocità  $v$  [m/s];
- densità  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>];
- area della superficie intercettata dalla vena fluida  $A$  [m<sup>2</sup>].

E' possibile quindi calcolare la portata in massa  $Q$  in [kg/s] di tale fluido, esprimibile per mezzo della seguente formula:

$$Q = \rho * A * v$$

La potenza (in W) disponibile e teoricamente convertibile in potenza utile, qualora fosse possibile arrestare completamente la vena fluida, risulta dalla formula seguente:

$$P = \frac{1}{2} Q * v^2 = \frac{1}{2} A * \rho * v^3$$

Si consideri che a parità di sezione A di captazione, la densità  $\rho$  e la velocità  $v$  e quindi la potenza a disposizione P risultano variabili con la quota.

La relazione che lega la densità dell' aria alla quota  $z$  viene espressa tramite la formula seguente:

$$\rho = \rho_0 + e^{-\left(\frac{0.297 * z}{3048}\right)}$$

In tale formula,  $\rho_0 = 1225 \text{ kg/m}^3$  rappresenta la densità dell' aria in condizioni standard, ovvero al livello del mare, ad una temperatura di  $15^\circ \text{ C}$  e ad una pressione di 1 atm. La densità risulta dunque decrescente all' aumentare della quota a cui viene posto il rotore eolico.

La formula seguente (legge di Hellman) esprime invece la velocità del vento ad una data quota  $z$  dove viene effettuato il posizionamento del rotore:

$$U_\infty = U_{\infty_0} (z/z_{cr})^n \quad (5.1)$$

Dove:

- $U_\infty$ : velocità indisturbata alla quota  $z$  desiderata;
- $U_{\infty_0}$ : velocità indisturbata alla quota  $z_{cr}$ , centro geometrico delle pale assunto come riferimento;
- $z$ : quota in cui valutare la velocità;
- $z_{cr}$ : centro geometrico delle pale assunto come riferimento;
  
- $n$ :  $n$  è il coefficiente di rugosità del suolo, compreso teoricamente tra 0 ed 1 e praticamente tra 0.1 e 0.4, dipendente dal tipo di terreno e dagli ostacoli presenti

La velocità del vento risulta dunque crescente con la quota.

La potenza teoricamente ottenibile da una turbina eolica quindi, aumenta con l'altezza (il contributo della velocità cresce più velocemente di quanto quello della densità decresca), ciò spiega il frequente ricorso a turbine sempre più alte.

La potenza effettivamente captabile da un rotore eolico però, anche considerando perdite nulle, si discosta comunque da quella teoricamente disponibile nella vena fluida, in quanto non è possibile “fermare” completamente la corrente ventosa. In tal caso, infatti, si registrerebbe un accumulo infinito di massa a valle del rotore, impedendo l'afflusso di altra aria e quindi il funzionamento dell'aerogeneratore.

La potenza utilmente sfruttabile risulta limitata superiormente dal “Limite di Betz”. Tale valore rappresenta la massima potenza estraibile dalla vena fluida, senza comunque considerare perdite meccaniche e fluidodinamiche.

Per il calcolo del limite, si ipotizza che:

- il tubo di flusso della vena ventosa non interagisca con il fluido circostante;
- il vento risulti di intensità costante con la quota;
- sussistano condizioni stazionarie;
- il rallentamento sia uniformemente distribuito sulla sezione del rotore;
- la distribuzione di velocità sia monodimensionale lungo l'asse di avanzamento della vena fluida;
- le sezioni infinitamente a monte e a valle del rotore siano fluidodinamicamente indisturbate;
- l'aria abbia densità costante;
- non vi siano effetti di rotazione della vena ventosa;
- il flusso eolico sia indisturbato oltre il rotore;

Nel calcolo originario del Limite di Betz, inoltre, si sono considerate una densità dell'aria pari a  $1.21 \text{ kg/m}^3$ , una temperatura di  $15^\circ \text{ C}$ , ed una pressione di 1 atm a livello del mare.

Il ragionamento teorico di seguito esposto è stato semplificato, per risultare più comprensibile, eliminando le considerazioni ritenute superflue.

L'andamento del tubo di flusso in prossimità ed in corrispondenza del rotore eolico viene schematizzato in figura 2.5.1.

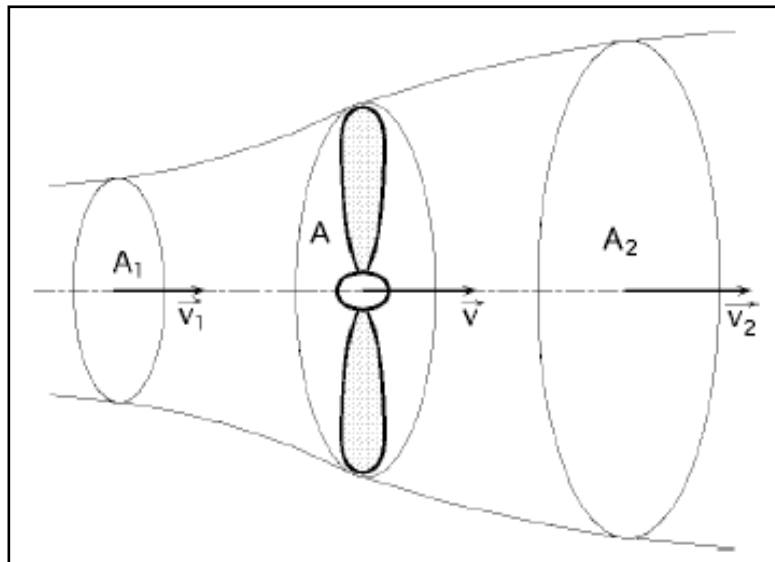


Figura 2.5.1: Schematizzazione del tubo di flusso in corrispondenza del rotore eolico

La velocità  $v_2$  del fluido a valle del rotore viene considerata come una frazione di quella a monte  $v_1$ , come espresso nella seguente formula:

$$v_2 = a * v_1$$

Il parametro  $a$  prende viene definito "fattore di interferenza del rotore". Risulta possibile esprimere la potenza captata dall' aerogeneratore attraverso due formule, nella prima, il valore della potenza si ottiene moltiplicando la portata in massa per la differenza tra l' energia cinetica posseduta del fluido rispettivamente a monte e a valle del rotore:

$$P = \rho * A * v * \left[ \frac{v_1^2}{2} - \frac{(a * v_1)^2}{2} \right]$$

Nella seconda, il valore della potenza si ottiene moltiplicando la velocità del vento in corrispondenza del rotore per la forza agente sulla girante stessa, ottenibile a sua volta come prodotto tra la portata in massa del fluido e la differenza tra la velocità del vento rispettivamente a monte e a valle dell' aerogeneratore. Tale forza è conseguenza dell' imposizione della quantità di moto, come da formula sottostante:

$$F = m * \frac{\Delta v}{\Delta t} = Q * (v_1 - v_2) = \rho * A * v * (v_1 - a * v_1)$$

La seconda espressione relativa alla potenza captata è espressa dunque dalla formula riportata di seguito:

$$P = \rho * A * v * (v_1 - a * v_1) * v = \rho * A * v^2 * (v_1 - a * v_1)$$

Eguagliando le due espressioni della potenza captata, si ricava la velocità del vento in corrispondenza del rotore eolico, ottenendo così, come si vede dalla formula sottostante una semplice media aritmetica tra le velocità a monte e a valle:

$$v = \frac{v_1 + a * v_1}{2}$$

Sostituendo il valore sopra determinato nella prima espressione della potenza captata, si ottiene:

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * v_1^3 * \left[ \frac{1}{2} (1 + a) * (1 - a^2) \right]$$

La grandezza tra parentesi quadre prende il nome di coefficiente di potenza teorico. Derivando l'espressione di tale coefficiente rispetto al fattore di interferenza del rotore "a" e ponendo la derivata ottenuta uguale a zero, si ottiene il valore di "a" in corrispondenza del quale il coefficiente di potenza teorico, e di conseguenza la potenza captata, risulta massimo. Il valore in questione del parametro a è pari ad 1/3, come è possibile accertare dal grafico riportato in figura 2.5.2.

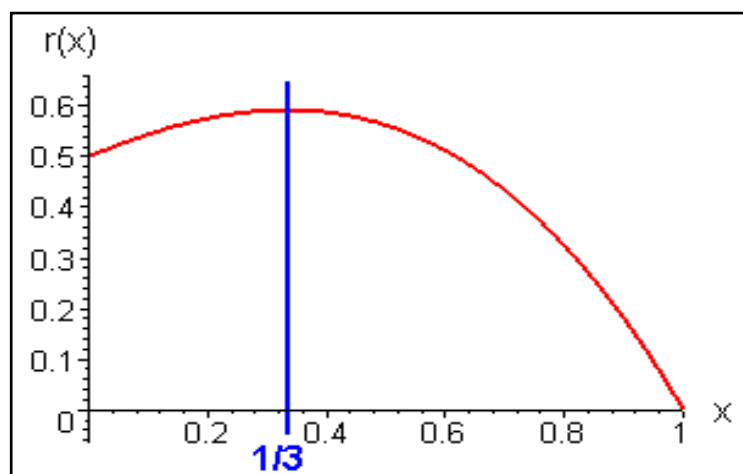


Fig.2.5.2: Andamento del fattore di interferenza del rotore e suo valore massimo

Sostituendo il risultato sopra ottenuto nell'espressione del coefficiente di potenza teorico si ottiene il valore massimo di quest'ultimo, che prende il nome di Limite di Betz. Tale limite rappresenta, come in precedenza detto, la massima potenza captabile dall'aerogeneratore in assenza di perdite, e risulta approssimativamente pari al 60%.

Considerando anche le perdite fluidodinamiche, meccaniche, quelle dovute ad inevitabili portate di fuga, all'interferenza tra le pale del rotore, si ottiene la formula definitiva della potenza captabile:

$$P = \frac{1}{2} \rho * A * v_1^3 * C_p$$

In tale formula,  $C_p$  rappresenta il coefficiente di potenza, ottenibile moltiplicando il coefficiente di potenza teorico per il rendimento del rotore, comprensivo delle perdite sopra specificate.

Tale relazione viene espressa nella formula sottostante:

$$C_p = C_{pt} * \eta_r$$

Nel calcolare l'espressione della potenza captata sopra riportata si è ipotizzato che la sezione incidente alla vena fluida sia ad essa perpendicolare. Diversamente, nella formula comparirebbe un ulteriore termine a fattore che rappresenterebbe l'angolo tra la direzione del vento e la normale alla superficie di intercettazione.

Considerando che il Limite di Betz è approssimativamente pari a 0.6 e che il rendimento del rotore è generalmente compreso tra 0.25 e 0.75, in funzione del tipo di aerogeneratore, si ha un andamento del coefficiente di potenza compreso solitamente tra i valori 0.15 e 0.45. Tale situazione si può verificare nel grafico di figura 2.5.3, dove viene riportato il coefficiente di potenza in funzione del coefficiente di velocità periferica, per varie tipologie di rotor eolici. Si nota che nel caso reale il coefficiente di potenza non è costante, bensì variabile in dipendenza dalla velocità del vento. Il coefficiente di velocità periferica è dato dal rapporto tra la velocità periferica delle pale del rotore, ottenuta moltiplicando la velocità di rotazione per lo sviluppo radiale della pala, e la velocità del vento, e rappresenta quindi un parametro molto significativo, rappresentativo delle condizioni anemologiche e di funzionamento dell'aerogeneratore.



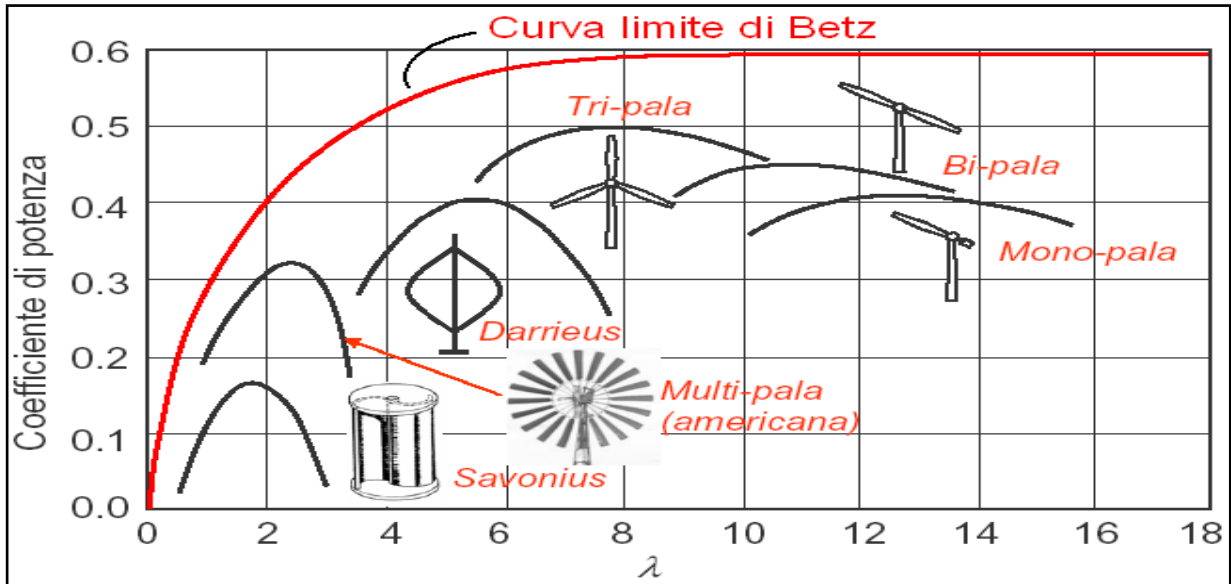


Fig. 2.5.3: Andamento del coefficiente di potenza in funzione del coefficiente di velocità periferica



## ***CAPITOLO 3***

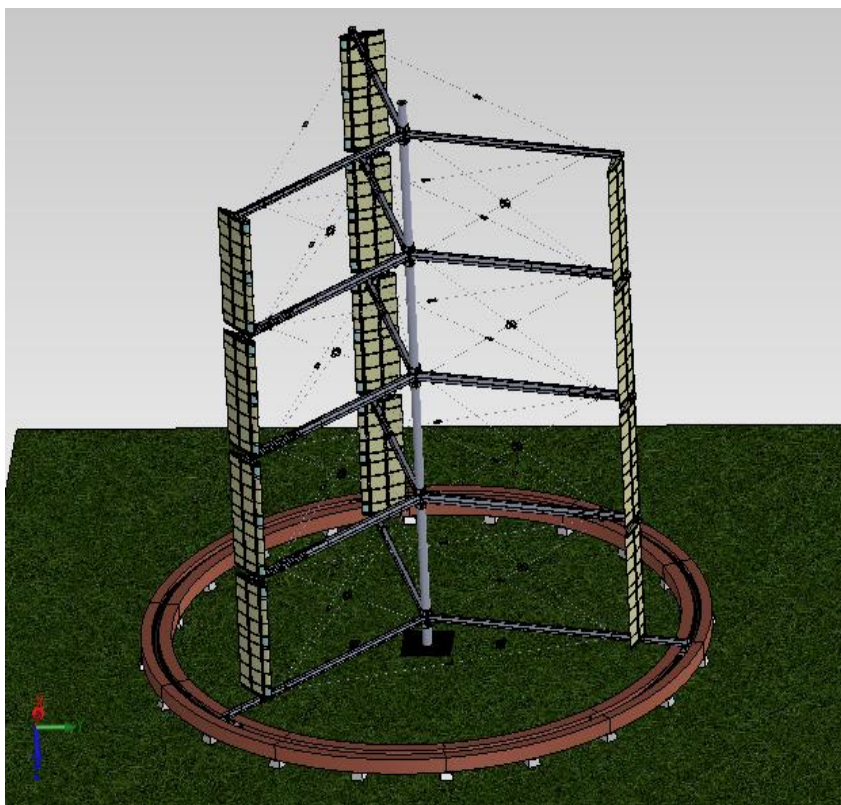
# ***PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI***

### ***3.1 VALUTAZIONE DELLE SOLUZIONI COSTRUTTIVE PRECEDENTI***

Come già enunciato precedentemente le peculiarità di questo impianto dovranno essere la facilità di trasporto, di montaggio e l'assenza del basamento di cemento armato, perciò la struttura deve essere appositamente pensata e progettata in funzione di questi importanti vincoli.

Come punto di partenza si è pensato di valutare le soluzioni già progettate, la più simile a ciò che si è voluto ottenere era la soluzione degli ingegneri Brighi e Nasolini (Fig. 3.1.1), in cui però dopo un attenta analisi sono state riscontrate alcune problematiche che in fase di progetto si è cercato di ovviare, ad esempio:

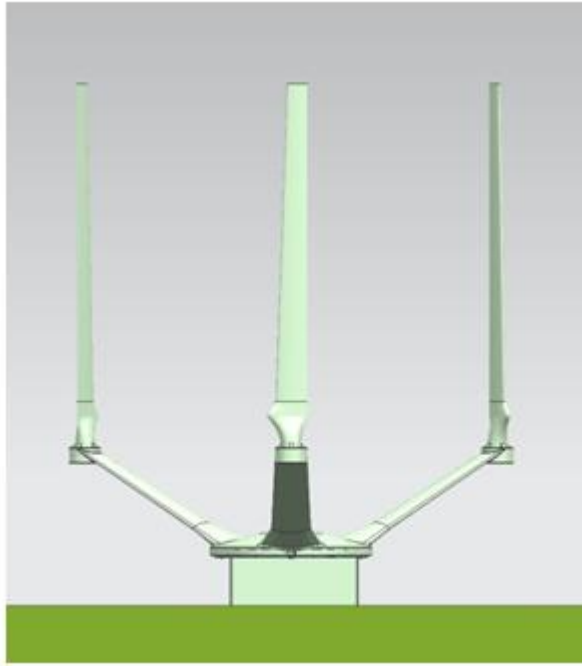
- poiché la facilità di trasporto e di montaggio sono state definite due priorità assolute, il palo centrale che è stato realizzato in un solo pezzo lungo oltre 12 metri e pesante 2258 Kg mal si concilia con tali esigenze;
- l'estrazione del generatore necessaria per l'eventuale manutenzione risulta pressoché impossibile;
- l'eccessivo ricorso a materiali e soluzioni costruttive specifiche e non commerciali (ad esempio la rotaia presenta un profilo molto complicato) fanno lievitare il costo della macchina;
- vi è la necessità di comunque di uno scavo per alloggiare l'alternatore sotto terra.



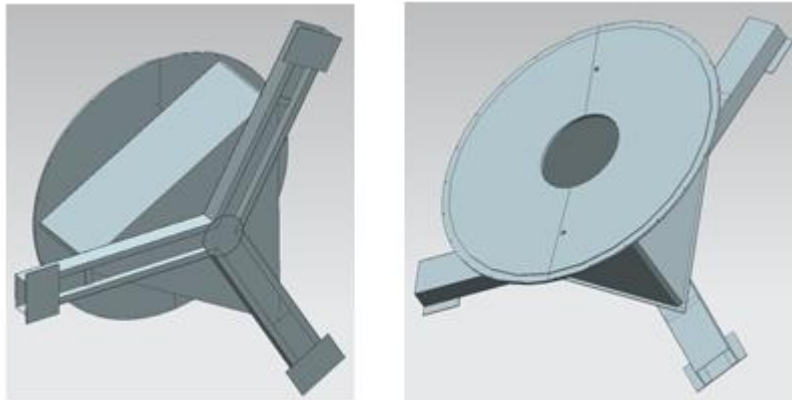
*Fig.3.1.1: Soluzione degli Ingegneri Brighi e Nasolini.*

Nella soluzione dell'Ingegnere Pontellini (Fig. 3.1.2) invece sono stati riscontrati altri problemi:

- non vi è lo scavo necessario per l'inserimento e l'eventuale estrazione del generatore;
- non essendo presente la guida circolare esterna e presentando una piccola base triangolare appoggiata su tre piedi metallici (Fig. 3.1.3), l'intera struttura è caratterizzata da un'elevata instabilità che ne pregiudicano l'utilizzo in condizione di moti ventosi anche solo di media entità;
- le pale sono caratterizzate da un notevole sviluppo longitudinale a sbalzo che non prevede l'utilizzo di tiranti di sicurezza, perciò all'aumentare della velocità e quindi della forza centrifuga, flettono perdendo la compattezza, andando incontro alla probabile rottura.



*Fig.3.1.2 Macchina progettata dall'Ingegnere Pontellini.*



*Fig.3.1.3 Base della soluzione Pontellini.*

Oltre a risolvere tutti i problemi riscontrati si è cercato di sviluppare una struttura più snella, caratterizzata da una maggior semplicità costruttiva, mantenendo inalterati i vincoli di progetto.

L'opzione di adottare una rotaia circolare a pavimento, come previsto nella prima soluzione riportata, è una soluzione vincente, infatti essa comporta notevoli vantaggi, innanzitutto sostiene la struttura senza richiedere fondamenta e poi migliora la centratura radiale dei carrelli (che risultano necessari per sostenere le pale) con una precisione maggiore rispetto al caso della soluzione "Pontellini".

### *CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI*

Da sottolineare il fatto che già in sede di progetto per centrare le specifiche richieste, si è voluto pensare la macchina priva del palo di sostentamento centrale, quindi a maggior ragione l'utilizzo di una ampia superficie di appoggio e di indirizzamento, come una rotaia circolare diviene fondamentale, per orientare e sostenere il moto dei carrelli (che nella versione in cantiere dovranno contenere anche i generatori ).

Si è voluto realizzare una turbina gradevole sotto l'aspetto estetico, studiando le parti anche per ottenere un basso inquinamento acustico.

Anche i materiali hanno assunto un importante ruolo, ed in particolare si sono voluti evitare materiali composti come il carbonio (soluzione Pontellini) a vantaggio di una maggior economicità della macchina. L'acciaio è stato utilizzato strettamente nelle parti in cui è richiesta un'elevata resistenza specifica ( come nel meccanismo di apertura delle pale e nei perni delle ruote), per non gravare sul peso, per il resto si è privilegiato l'uso dell'alluminio che sia nei componenti strutturali e che non ha ricoperto il ruolo principale.

### **3.2 CALCOLO DELLA POTENZA EROGATA**

Per il calcolo della potenza ottenibile dalla turbina, attraverso l'interazione con una vena fluida, è stato realizzato un foglio elettronico mediante il software "Wolfram Mathematica 7". La realizzazione dello stesso ha comportato diverse fasi, come la raccolta di dati dalle soluzioni precedenti, la valutazione dei valori teorici ottimali per fattori da adottare e la stesura finale del foglio.

Vista l'altezza non trascurabile di 10 metri che si presume raggiunga l'aerogeneratore, diviene fondamentale considerare, con opportuni coefficienti, che la velocità del vento dipende sia dai parametri atmosferici, sia dalla conformazione del terreno, fattori che fanno sì che le velocità si modifichi con la quota. Per stimare questa variazione è stata adottata la legge di Hellman (già citata nel capitolo precedente), che ha permesso di valutare l'effettiva velocità relativa del vento su ogni elemento di pala, ed è la seguente:

$$U_{\infty} = U_{\infty_0} (z/z_{cr})^n \quad (3.1)$$

Più sono presenti asperità nel terreno, come bruschi cambiamenti di pendenza, costruzioni, boschi, montagne, più la velocità del vento sarà limitata, a tal riguardo si valuti la tabella seguente (in cui viene riportato l'esponente "n" utilizzato nella (3.1)) e le figure 3.2.1 e 3.2.2.

VALORE COEFFICIENTE	TIPO DI TERRENO
0,12	Aree agricole aperte con presenza limitata di ostacoli bassi
0,16	Aree agricole con presenza limitata di ostacoli di media grandezza 6÷8 metri
0,2	Aree agricole con presenza di numerosi ostacoli di media grandezza 6÷8 metri
0,3	Zone urbane, boschi



Fig.3.2.1: Rugosità del terreno



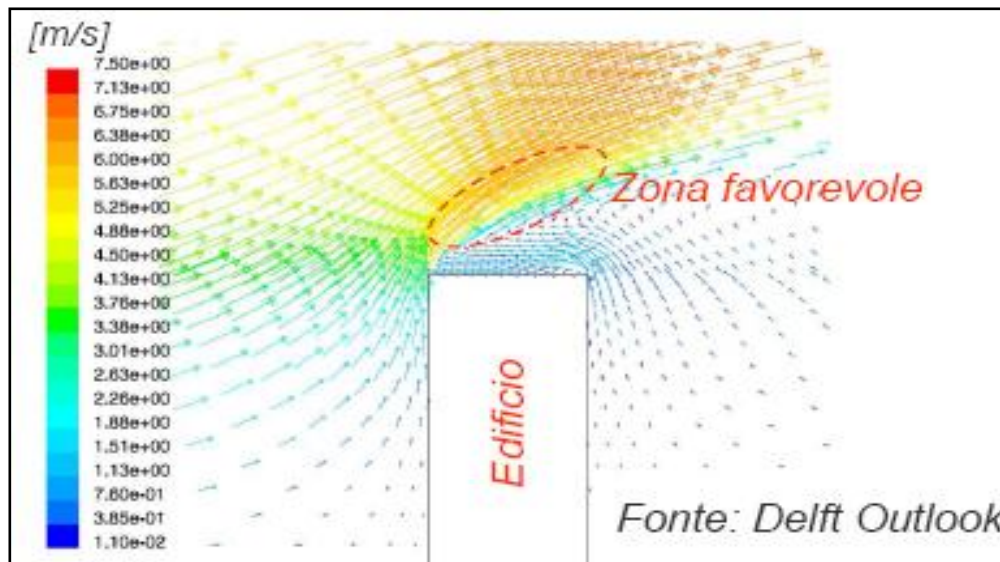


Fig. 3.2.2: Ventosità influenzata dalla presenza di edifici

Per rendere precisa la simulazione si può agire sul numero di suddivisioni dell'altezza, su quelle angolari e anche sulla precisione, parametro quest'ultimo che arresta le iterazioni necessarie alla ricerca del fattore di interferenza, quando la soluzione trovata, rispetto alla soluzione ottenuta nella iterazione precedente, differisce di una quantità inferiore alla precisione imposta.

E' stato fissato anche un numero massimo di iterazioni oltre il quale non avendo trovato una soluzione che rientra nella precisione impostata l'elaborazione si ferma e utilizza quella dell'ultima iterazione per evitare che si continui all'infinito nelle situazioni di non convergenza a cercare il parametro desiderato.

Tra i valori impostati in ingresso (Fig 3.2.3) compare la velocità uinf0 ( $U_{\infty}$ ) della vena indisturbata alla quota "zcr" di riferimento per il centro del rotore, che viene inserita dal programma nella equazione 3.1 ricavando le velocità indisturbate alle varie quote, è un parametro indispensabile sia al calcolo della potenza media in funzione della velocità tangenziale delle pale, sia al calcolo del valore del coefficiente di potenza di cui si ricava l'andamento con una interpolazione lineare per diversi valori del "tip speed ratio" (che verrà nel seguito definito).

In seconda istanza compare la velocità tangenziale massima della pala  $U_{tmax}$  che viene utilizzata unicamente per diagrammare nel tempo il valore della coppia e ottenere la potenza media generata dall'aerogeneratore. Per determinarla sono state effettuate le seguenti considerazioni:

La turbina come enunciato dovrà erogare 100 KW ad una velocità indisturbata del vento pari a 16 m/s, si definisce così il rapporto T.S.R.:

$$(\text{Tip Speed Ratio}) = \frac{\text{vel.tang.pale}}{\text{vel.vento indisturbato}}$$

Il TSR, per la caratteristica delle turbine Darrieus di poter girare più forte del vento stesso che le fa ruotare grazie alla portanza, può assumere valori maggiori di 1 ed arrivare per sino a 10 per le turbine di piccole dimensioni, in questo caso viene assunto pari a 3, quindi si è potuto ricavare la velocità tangenziale delle pale che sarà :

$$vel. tang. pale = T.S.R. * vel. vento indisturbato$$

Da cui si avrà:

$$vel. tang. pale = 3 * 16 = 48 m/s$$

```
(* DATI INPUT *)
(*velocità indisturbata vento nel centro del rotore (m/s)*)
uinf0 = 16;
(*velocità tangenziale pala (m/s)*)
utMax = 48;
(*altezza rotore (m)*)
h = 10;
(* raggio rotore ad H (m)*)
r = 5;
(*corda (m)*)
c = 1;
(*numero divisioni lungo l'altezza*)
n = 10;
(*numero divisioni angolari*)
nteta = 36;
(*numero pale*)
nb = 3;
(*quota a cui installare il centro del rotore (m)*)
zcr = 6.2;
(*fattore per legge di hellman*)
esp = 0.16;
(*densità aria (Kg/m^3)*)
d = 1.204;
(*viscosità cinematica aria (m/s^2)*)
v = 1.5 * 10^(-5);
(*precisione*)
e = 0.01;
```

Fig. 3.2.3:Fattori in input nel foglio di calcolo

### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

La scelta del numero e delle dimensioni delle pale e quindi del rotore, sono state effettuate valutando le soluzioni precedenti. Sono infine elencate le caratteristiche fisiche dell'aria.

Per quel che riguarda il profilo NACA 0018, scelto per il profilo alare delle pale della turbina, si è provveduto a ricercare in specifici testi, i coefficienti di portanza ( $C_L$ ) e resistenza ( $C_D$ ) al variare del numero di Reynolds, valutato come prodotto tra la velocità relativa sul bordo di attacco della pala e la corda, rapportato alla viscosità cinematica. Con i dati trovati si è realizzato un foglio di calcolo "excel" che il programma utilizza per prelevare da esso i corretti coefficienti di portanza e resistenza a seconda del valore del numero di Reynolds palare che il programma stesso ha precedentemente valutato. In Fig. 3.2.4 si riporta il foglio realizzato per poter eseguire tale operazione.

```
(*INIZIO SUBROUTINE*)
TABNACA = Import["C:\\reynolds\\naca0018.xls", "XLS"];
(*HNACA riporta i numeri di Reynolds per i quali ho i valori dei coeff di portanza e resistenza*)
HNACA = {40 000, 80 000, 160 000, 360 000, 700 000, 1 000 000, 2 000 000, 5 000 000};
Media[a_, b_] := ((a + b) / 2)
(*A seconda del numero di Reynolds calcolato obbligo a scegliere uno tra quelli che compare in HNACA*)
indexHNACA[] := (
  Which[re <= Media[HNACA[[1]], HNACA[[2]]], 1, re <= Media[HNACA[[2]], HNACA[[3]]], 2, re <= Media[HNACA[[3]], HNACA[[4]]],
  3, re <= Media[HNACA[[4]], HNACA[[5]]], 4, re <= Media[HNACA[[5]], HNACA[[6]]], 5, re <= Media[HNACA[[6]], HNACA[[7]]],
  6, re <= Media[HNACA[[7]], HNACA[[8]]], 7, re > Media[HNACA[[7]], HNACA[[8]]], 8
)
```

Fig. 3.2.4: Foglio realizzato per importare i valori di  $C_D$  e  $C_L$

C'è però da constatare un fatto, se da un lato si valutano le variazioni dei coefficienti in base al numero di Reynolds dall'altro non si tiene conto della tridimensionalità della pala che tende a incrementare la resistenza e ridurre la portanza, inoltre avendo realizzato il programma sulla base di un modello matematico in ogni caso semplificato, non si considera lo stallo dinamico. Il foglio di calcolo non valuta neppure la eventuale variazione di velocità in punti a pari quota, che sono determinabili solo con l'ausilio di valutazioni sperimentali.

In funzioni di questi "difetti" finali appena enunciati, va detto che la tridimensionalità provoca effetti sì negativi sulla efficienza ma lo stallo dinamico è un fenomeno che crea, per un breve lasso di tempo, un aumento di portanza in quanto il repentino cambio dell'angolo di incidenza provoca un ritardo nella separazione dello strato limite che comporta un temporaneo aumento dell'efficienza, sommando quindi tutti e due gli effetti nel complesso si compenserebbero, risulta perciò accettabile l'ipotesi di trascurarli entrambi.

Si riportano ora (Fig 3.2.5, 3.2.6, 3.2.7, 3.2.8, 3.2.9) i grafici ottenuti con "Wolfram Mathematica":

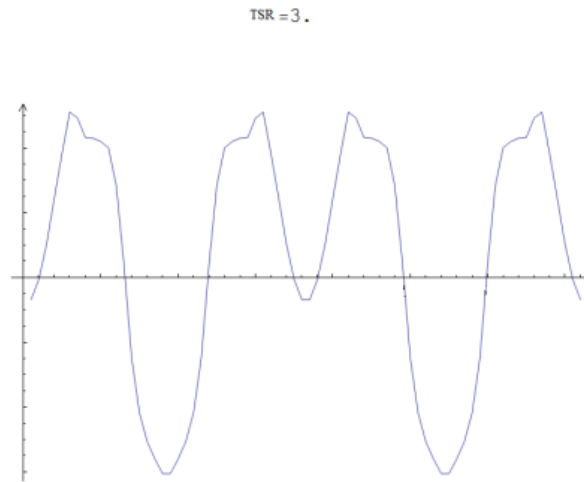


Fig.3.2.5: Dati di coppia ottenuti dalla simulazione per un TSR pari a 3

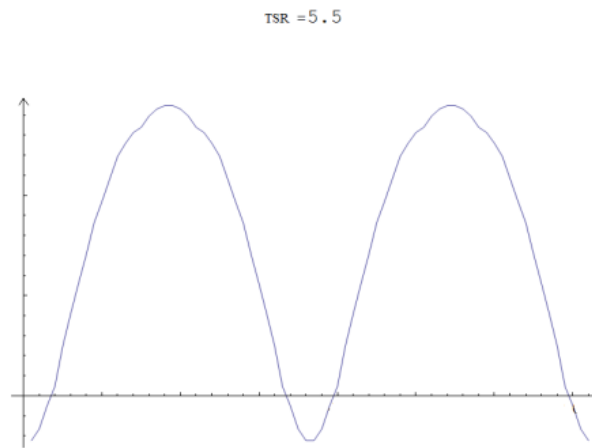


Fig.3.2.5: Dati di coppia ottenuti dalla simulazione per un TSR pari a 5.5

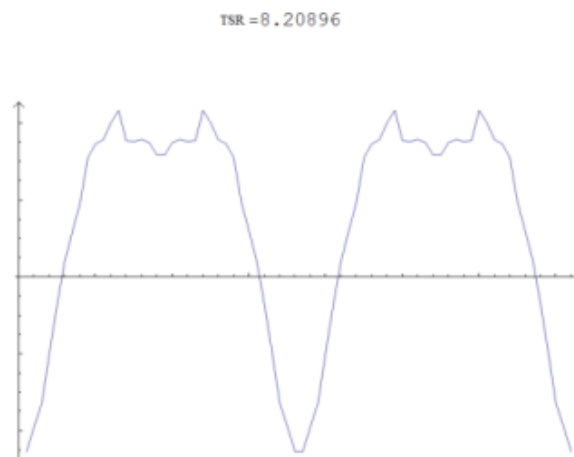


Fig.3.2.7: Dati di coppia ottenuti dalla simulazione per un TSR pari a 8.2

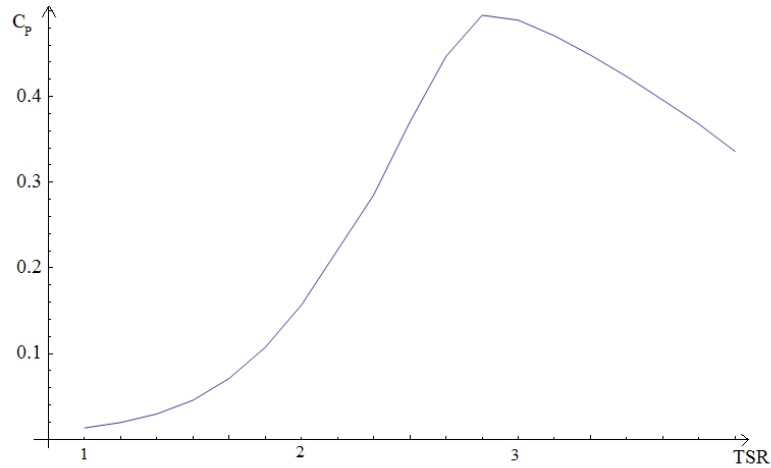


Fig.3.2.8: Coefficiente di potenza stimato in funzione del TSR

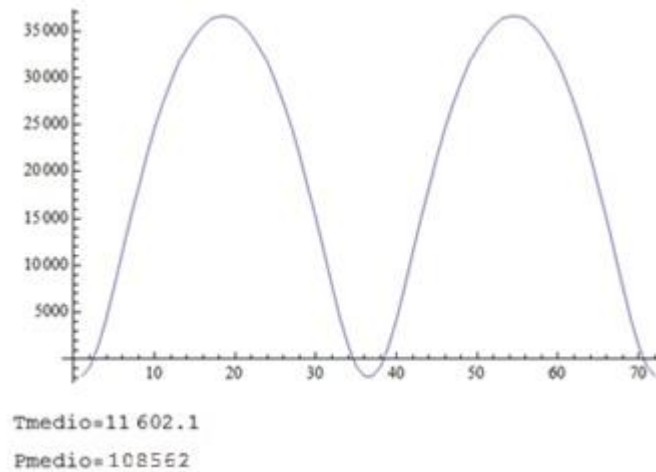


Fig. 3.2.9: Coppia media e potenza stimate in funzione della posizione del rotore

Sono state effettuate numerose prove per ottenere delle dimensioni per la turbina tali da garantire i vincoli progettuali già enunciati. La scelta di adottare un rotore tripala non è stata casuale, bensì il frutto di diverse considerazioni:

- 1) Questo tipo di rotore presenta la totale indipendenza del tempo di avviamento in funzione della posizione di partenza, cosa che non avviene per i rotori mono e bipala (Fig. 3.2.10)

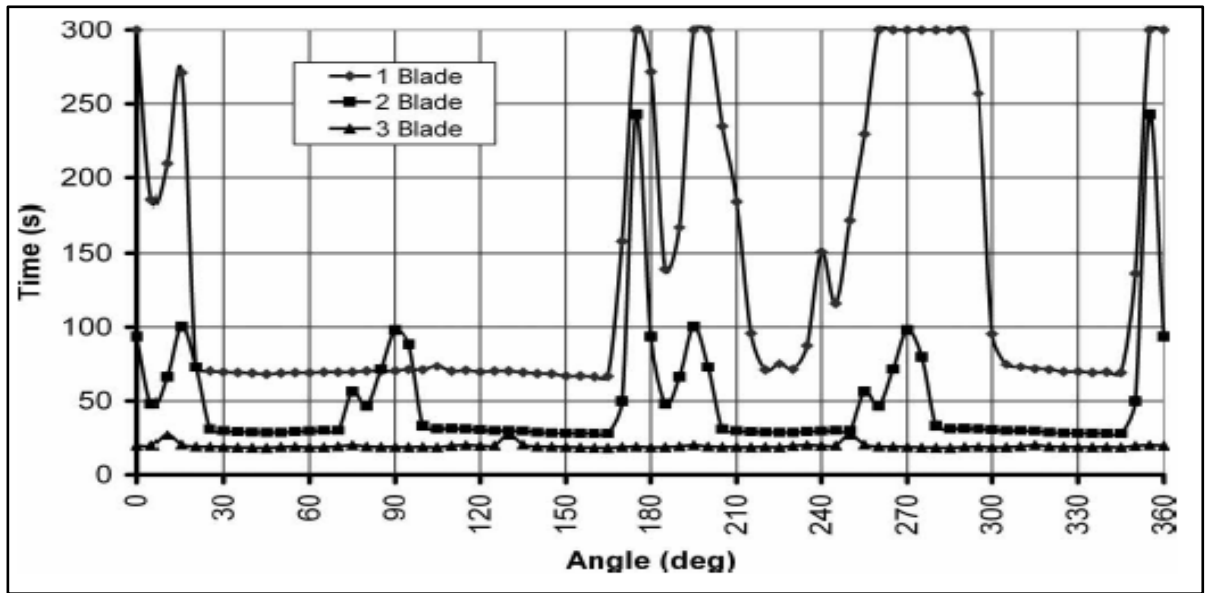


Fig.3.2.10 : Omogeneità di rotazione di turbine, monopala, bipala e tripala.

- 2) Un altro motivo di tale scelta è dovuto alle basse sollecitazioni nel complesso a cui il rotore tripala è sottoposto: rilevante importanza nella scelta ha assunto il parametro  $\frac{N_b C}{R}$ , detto solidità, che viene utilizzato per valutare l'interazione tra le pale e per ricavarne il numero ottimale che garantisca il massimo coefficiente di potenza per un prefissato valore del TSR. Si riporta nella figura 3.2.11 sottostante un grafico rappresentativo per valutare gli effetti della solidità.

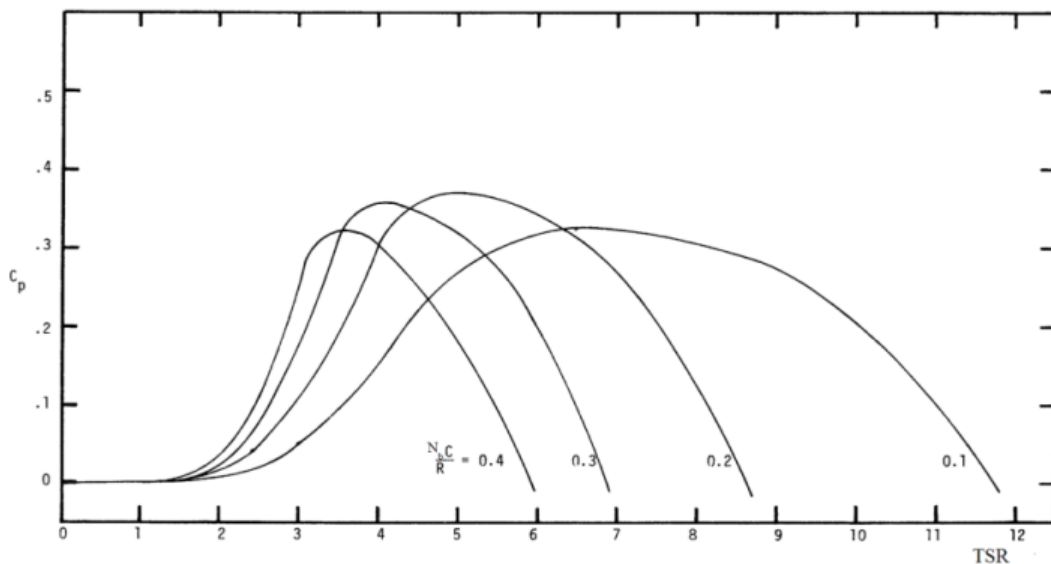


Fig. 3.2.11: Influenza del parametro "solidità" sul coefficiente di potenza  $C_p$ .

Dall'analisi di fig. 3.2.11 si può dedurre che:

- all'aumentare della solidità e quindi del numero di pale si ha un valore del coefficiente di potenza che è massimo per valori del TSR minori;
- che per avere un buon compromesso tra coefficiente di potenza e solidità si poteva scegliere tra un rotore a due, tre o quattro pale;

Si può quindi affermare che a pari dimensioni della turbina le due pale sono più efficienti, si risparmia sul peso ma sono soggette a carichi e vibrazioni molto più elevati dovendo ruotare ad un maggior numero di giri, perciò questa soluzione viene scartata a favore di una a tre pale meno sollecitata sotto questo punto di vista ruotando con velocità angolari inferiori. La soluzione a quattro pale non viene adottata perché malgrado sia caratterizzata da un'elevata solidità penalizza troppo le prestazioni.

Si è ottenuto così, dal foglio di calcolo che la turbina dovrebbe essere in grado di generare 108,6 kW con 16 m/s di vento indisturbato, con un TSR pari a 3. Si ricorda tuttavia come tale valore sia stato ricavato senza considerare la resistenza aerodinamica dovuta ai bracci di sostegno.

In questo tipo di macchina in cui la potenza nominale è ottenuta con un numero di giri piuttosto elevato, risulta importante valutare l'adozione di sistemi di sicurezza attivi e passivi, che nel caso di un vento superiore a 16 m/s permettano di non aumentare la velocità angolare per evitare di avere un sovraccarico del generatore e a una sovrasollecitazione del rotore per via delle eccessive forze centrifughe. Visto che la soluzione studiata prevede l'utilizzo di carrelli su rotaia circolare, come freno attivo si potrebbe pensare di dotare gli stessi di un semplice freno attivo a disco o a tamburo per ovviare i problemi sopraesposti.



### 3.3 IL PROFILO ALARE E LA SCELTA DEL TIPO DI ROTORE

#### 3.3.1 CONSIDERAZIONI GENERALI SUI PROFILI ALARI

Il profilo alare ( Fig. 3.3.1) è la sezione di un'ala condotta secondo un piano verticale e parallelo alla mezzeria dell'ala stessa.

Secondo il teorema di Kutta-Joukowski, si crea una circolazione attorno al profilo che genera una forza, in direzione perpendicolare alla corrente indisturbata, detta portanza che tende a sostentarli. Tale teorema vale solamente in condizioni di viscosità trascurabile (flusso euleriano). In generale la portanza non è l'unica forza agente sul profilo: la viscosità del fluido genera anche una resistenza fluidodinamica, una componente della risultante delle forze aerodinamiche diretta parallelamente alla corrente indisturbata.

In ogni profilo alare vi sono caratteristiche geometriche importanti:

- $\alpha$ : incidenza geometrica
- $c$ : corda
- 1: linea di portanza nulla
- 2: bordo d'attacco
- 3: cerchio osculatore del bordo d'attacco
- 4: curvatura
- 5: spessore
- 6: dorso
- 7: bordo d'uscita
- 8: linea d'inarcamento media
- 9: ventre.

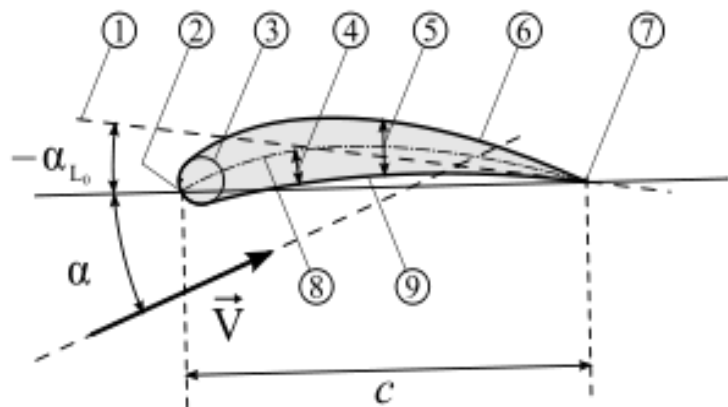


Fig. 3.3.1: Profilo alare

La forma dei profili alari è fondamentale per la creazione della portanza che consente al rotore della pala eolica di ruotare e quindi in seconda battuta di cedere potenza all'alternatore.

Assumono perciò una rilevante importanza anche i seguenti fattori caratteristici:

- Linea di inarcamento medio: la linea che unisce i punti equidistanti tra dorso e ventre.
- Freccia: distanza tra linea media e corda misurata perpendicolarmente alla corda.
- Linea di portanza nulla: la linea, passante per il bordo d'uscita, parallela alla direzione della corrente per la quale la portanza del profilo è nulla.
- Incidenza geometrica od angolo d'attacco geometrico: angolo formato dalla corda con la corrente indisturbata.

- Il centro di pressione di un profilo alare è il punto in cui possiamo immaginare applicata la risultante delle forze fluidodinamiche agenti sul profilo stesso.
- Il punto neutro dell'ala, detto anche fuoco o centro aerodinamico, è il punto in cui il coefficiente di momento agente sul profilo rimane generalmente costante al variare dell'incidenza. Solitamente si trova in una zona attorno al 25% della corda (quarto di corda).

Esistono poi infinite forme per i profili, ed è per questo che vengono classificati secondo diverse categorie. La prima distinzione (Fig. 3.3.2) viene effettuata analizzando le curvature dell'estradosso e dell'intradosso:



Fig. 3.3.2: Diverse geometrie per i profili

- Concavo-convesso: sia l'intradosso che l'estradosso hanno la parte centrale della curvatura più in alto rispetto ai punti di ingresso e di uscita;
- Concavo-convesso moderno: è più simile ad un piano convesso, rispetto a quello precedente, ed ha ottime prestazioni alle basse velocità. In genere è anche un profilo laminare;
- Piano-convesso: l'estradosso è come nel caso precedente, mentre l'intradosso è piatto. È un tipo di profilo non ottimale, ma economico;
- Biconvessi: intradosso ed estradosso hanno curvature opposte. Se i profili, pur curvati in senso opposto, sono differenti, si parla di profili biconvessi asimmetrici, mentre, se hanno identica forma, si parla di profili simmetrici;
- Laminari: sono i profili, che, indipendentemente dal loro spessore, riescono a mantenere un flusso non turbolento su una parte rilevante della propria corda.
- Profili subcritici: sono profili che, grazie alle loro caratteristiche geometriche, possiedono un numero di Mach critico più elevato possibile.
- Profili supercritici: sono profili alari che possiedono un numero di Mach critico più basso di un profilo normale. A causa di ciò la formazione di una regione supersonica sul dorso si manifesterà a velocità più basse conferendo forma tale al profilo per garantire che la ricompressione avvenga con minori perdite di energia possibile.

Sono oltre 2000 i profili normati definiti in modo univoco ed utilizzati nella produzione dei velivoli di serie. I più comuni sono quelli definiti dall'organizzazione governativa americana NACA identificati con numeri a 4 o 5 cifre, il progetto di queste famiglie di profili è anteriore 1940 ma ancora oggi, quando si avvia il progetto di una produzione in serie di profili alari ad uso civile che debbano lavorare in campo subsonico per la scelta del profilo di riferimento ci si rivolge ad un profilo NACA.

Ad esempio, le cifre successive alla sigla NACA per i profili a 4 cifre (es. NACA 2415), hanno il seguente significato:

- 1<sup>a</sup> cifra, valore della freccia massima in percentuale della corda (es. 2 → 0,02 c);
- 2<sup>a</sup> cifra, distanza dal bordo d'attacco della posizione della freccia massima, in decimi della corda (es. 4 → 0.4 c);
- 3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup>, spessore massimo, in percentuale della corda (es. 15 → 0,15 c).

Talvolta alle quattro cifre, separate da un trattino (es. NACA 2415 – 24), sono aggiunte altre due cifre che indicano:

- 5<sup>a</sup> cifra, il raggio del bordo d'attacco, in percentuale della corda (es. 2 → 0,02 c);
- 6<sup>a</sup> cifra, la distanza dal bordo d'attacco del massimo spessore, in decimi della corda (4 → 0,4 c).

Per i profili a 5 cifre - costruiti utilizzando cinque tipi di linea media - (es. NACA 23012), esse hanno il seguente significato:

- 1<sup>a</sup> cifra, moltiplicata per 3/20, il coefficiente di portanza per il quale il profilo è stato progettato
- 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> cifra, distanza dal bordo d'attacco della posizione della curvatura massima divisa per 2, in percentuale della corda (es. 30 → 0,15 c).
- 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> cifra, valore dello spessore massimo, in percentuale della corda (es. 12 → 0,12 c).

### 3.3.2 SCELTA DEL PROFILO ALARE

Lo studio del profilo alare più indicato alle esigenze di progetto ha ricoperto un ruolo fondamentale. Dopo diverse ricerche e prove si è deciso di utilizzare per l'impianto pale di realizzazione identica alle ali degli aerei (Fig. 3.3.3), utilizzando uno scheletro interno costituito da longheroni e centine che danno un'elevata rigidità consentendo però di mantenere i pesi piuttosto limitati.

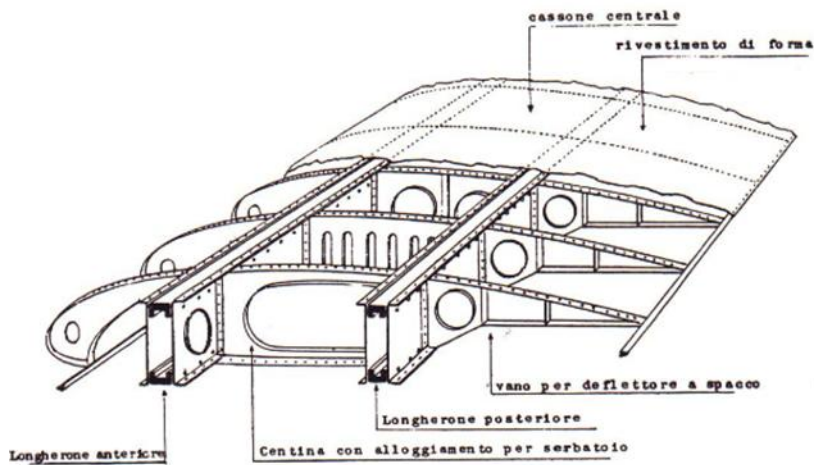


Fig. 3.3.3: Ala bilongherone di un aereo

In particolare per il profilo alare, ovvero la sezione della pala, si è optato per un profilo biconvesso simmetrico, infatti il rotore deve funzionare continuamente nell'arco di una rivoluzione completa, con un angolo di attacco che da positivo diventa negativo; la simmetria garantisce un ugual comportamento del profilo in una posizione  $\theta$  e in quella corrispondente nella metà opposta ( $2\theta - \theta$ ), si sceglie perciò un'ala bilongherone, che oltre la simmetria è caratterizzata anche da una buona rigidità e resistenza.

Nello specifico si è deciso di adottare un profilo NACA 0018 che è quello, rispetto agli altri profili NACA, caratterizzato da un maggior spessore centrale che quindi garantisce maggior rigidità.

Per la realizzazione del profilo è stata utilizzata un'applicazione che, una volta inserita la sigla del profilo che si vuole ottenere secondo la nomenclatura descritta in precedenza, calcola automaticamente le coordinate dei punti attraverso le equazioni del dorso e del ventre del profilo.

Per migliorare o diminuire l'accuratezza del profilo ottenuto si può agire sui punti per cui deve passare la curva, come si può notare dalla figura 3.3.4, si è optato per una quantità di 200 punti, che è un buon compromesso tra precisione e velocità di calcolo.

Profilo Naca (4 0 5 cifre)	<input type="text" value="0018"/>
Numero di punti (10 - 300)	<input type="text" value="200"/>

Fig.3.3.4: Applicazione per il calcolo del profilo alare NACA: dati di input

Si riportano nelle figura 3.3.5 e 3.3.6 i dati in uscita che vengono forniti dall'applicazione: la prima è una tabella di coordinate dei punti per cui passa il profilo NACA scelto, la seconda ne è la sua rappresentazione schematica.

Xupper	Yupper	Xlower	Ylower
0,000000	0,000000	1,000000	-0,001890
0,000062	0,002092	0,999938	-0,001903
0,000247	0,004169	0,999753	-0,001942
0,000555	0,006232	0,999445	-0,002007
0,000987	0,008281	0,999013	-0,002098
0,001541	0,010315	0,998459	-0,002214
0,002219	0,012334	0,997781	-0,002356
0,003020	0,014338	0,996980	-0,002524
0,003943	0,016328	0,996057	-0,002718
0,004988	0,018299	0,995012	-0,002937
0,006156	0,020255	0,993844	-0,003181
0,007445	0,022195	0,992555	-0,003450
0,008856	0,024118	0,991144	-0,003744
0,010389	0,026023	0,989611	-0,004062
0,012042	0,027911	0,987958	-0,004406
0,013815	0,029781	0,986185	-0,004773
0,015708	0,031632	0,984292	-0,005164
0,017721	0,033464	0,982279	-0,005579
0,019853	0,035276	0,980147	-0,006018
0,022103	0,037068	0,977897	-0,006479
0,024472	0,038840	0,975528	-0,006964
0,026957	0,040590	0,973043	-0,007471
0,029560	0,042319	0,970440	-0,008000
0,032278	0,044026	0,967722	-0,008551
0,035112	0,045709	0,964888	-0,009123
0,038060	0,047370	0,961940	-0,009716
0,041123	0,049006	0,958877	-0,010331
0,044298	0,050618	0,955702	-0,010965
0,047586	0,052204	0,952414	-0,011620
0,050986	0,053765	0,949014	-0,012294
0,054497	0,055300	0,945503	-0,012987
0,058117	0,056808	0,941883	-0,013698
0,061847	0,058288	0,938153	-0,014429
0,065684	0,059740	0,934316	-0,015176
0,069629	0,061164	0,930371	-0,015942

Fig.3.3.5: Dati in uscita dell'applicazione: tabella con le coordinate del profilo



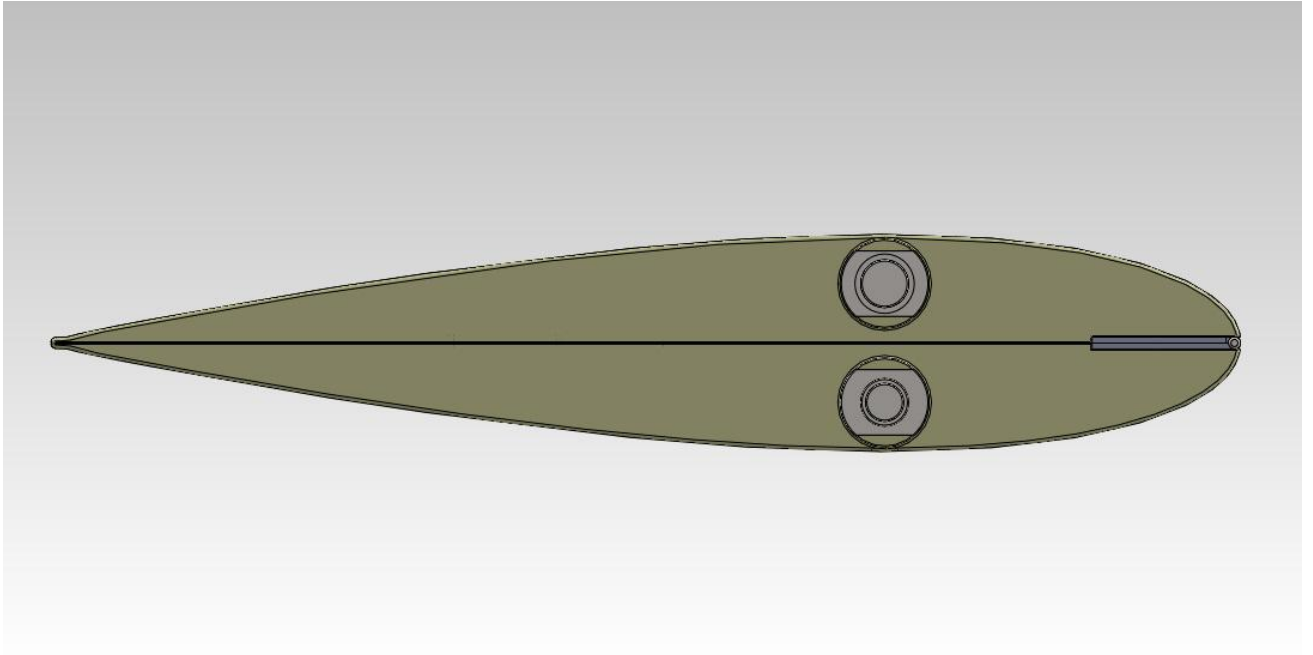
Fig.3.3.6: Dati in uscita dell'applicazione: rappresentazione del profilo NACA 0018

### *CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI*

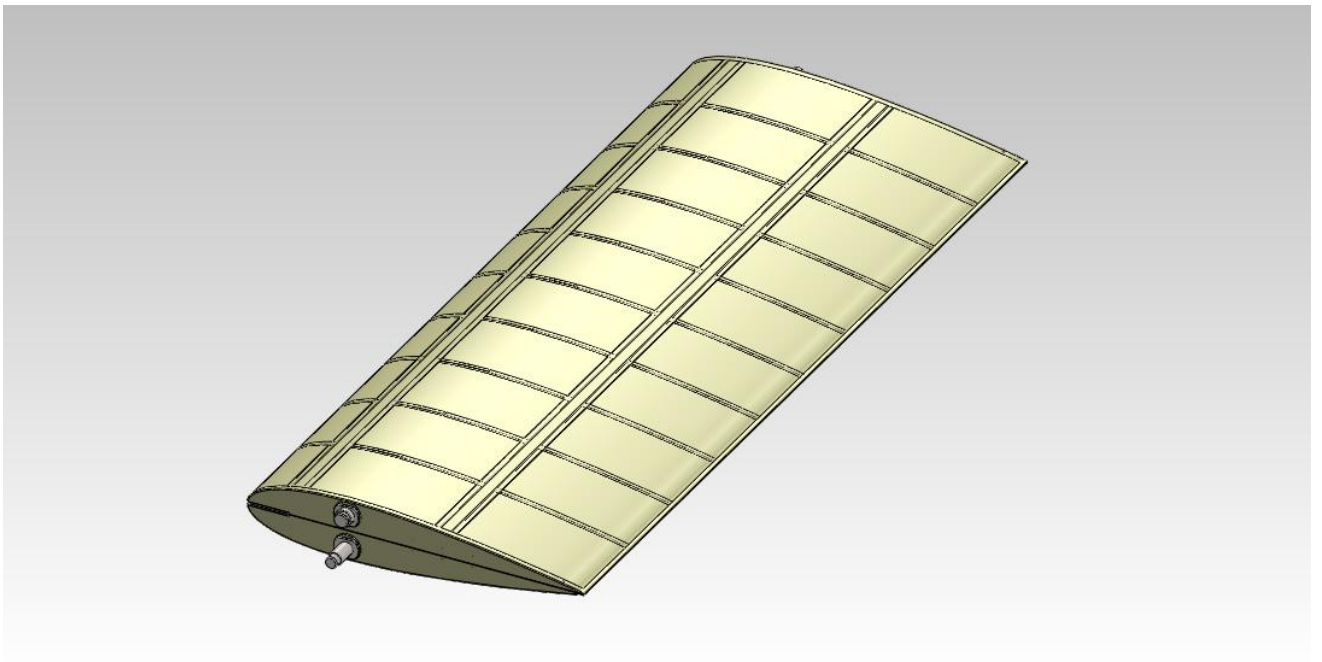
La rappresentazione del profilo che viene fornita però non è direttamente sfruttabile nel software 3 D “Solid Works 2011” perché è una semplice immagine, per poter ottenere una curva parametrica occorre invece convertire la tabella di figura 3.3.5 in un file di testo di tipo .txt, che a sua volta deve essere inserito nel software 3D, e utilizzando la funzione “inserisci curva” è possibile tracciare il profilo passante per i punti determinati. Ottenuta così la sezione esterna del profilo e quindi della pala si è provveduto poi a progettare tutta la struttura interna.

Ogni pala è stata realizzata mediante l’unione, con una cerniera in corrispondenza del bordo di attacco, di due mezzi profili per far sì di consentire il funzionamento del sistema di avviamento che verrà descritto nel paragrafo successivo. Si è ottenuto per la pala uno sviluppo longitudinale di 2.5 m (Fig.3.3.7, Fig.3.3.8) (facendo quattro livelli si ottiene un’altezza complessiva della macchina assemblata di circa dieci metri come ipotizzato nei paragrafi precedenti) e una corda di 1m. Ogni profilo all’interno è formato da due longheroni a doppia anima (Fig. 3.3.9), sulle anime vengono rivettate le centine di spessore 1,5mm. Ogni profilo presenta 9 centine montate in modo equidistanziato l’una dall’altra di 246 mm in modo che, considerando i due spessori relativi alle pareti di chiusura laterali di profili, si ottengono 10 spazi interni uguali. Nello stesso modo in cui sono realizzate le centine per uso aeronautico anche in questo caso sono state realizzate in modo che lasciassero ampi spazi vuoti all’interno della sezione, per far sì di non inficiare sul peso complessivo della pala.

Tutti i principali componenti sono stati collegati fra loro tramite rivettatura, un metodo rapido, efficace ed economico.

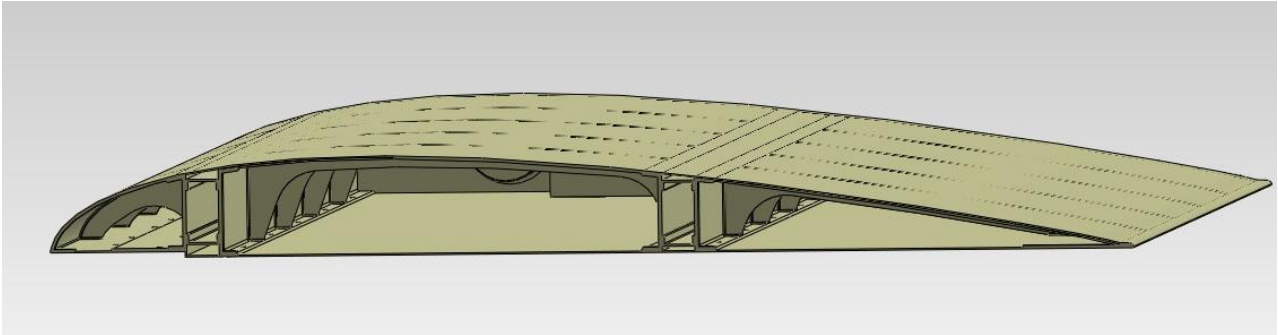


*Fig. 3.3.7: Profilo alare della pala eolica*



*Fig.3.3.8: La pala nel suo complesso*



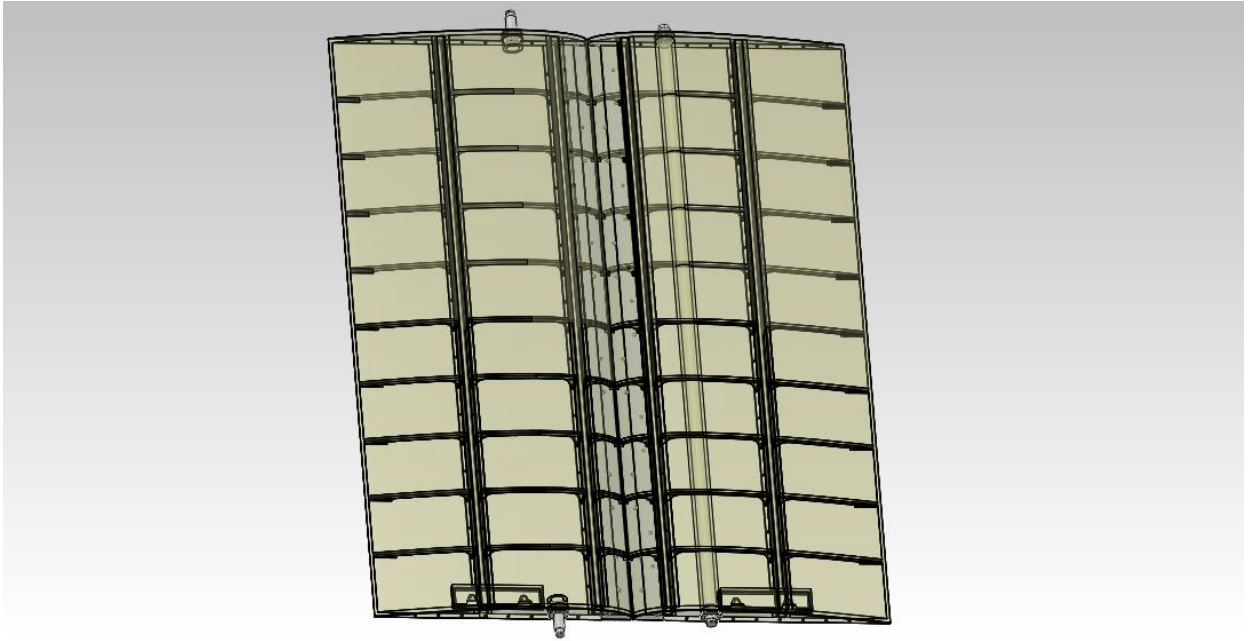


*Fig. 3.3.9: Sezione della pala: sono ben visibili i due longheroni portanti ad anima doppia, le centine suddivise in tre sezioni collegate attraverso rivetti ai longheroni.*

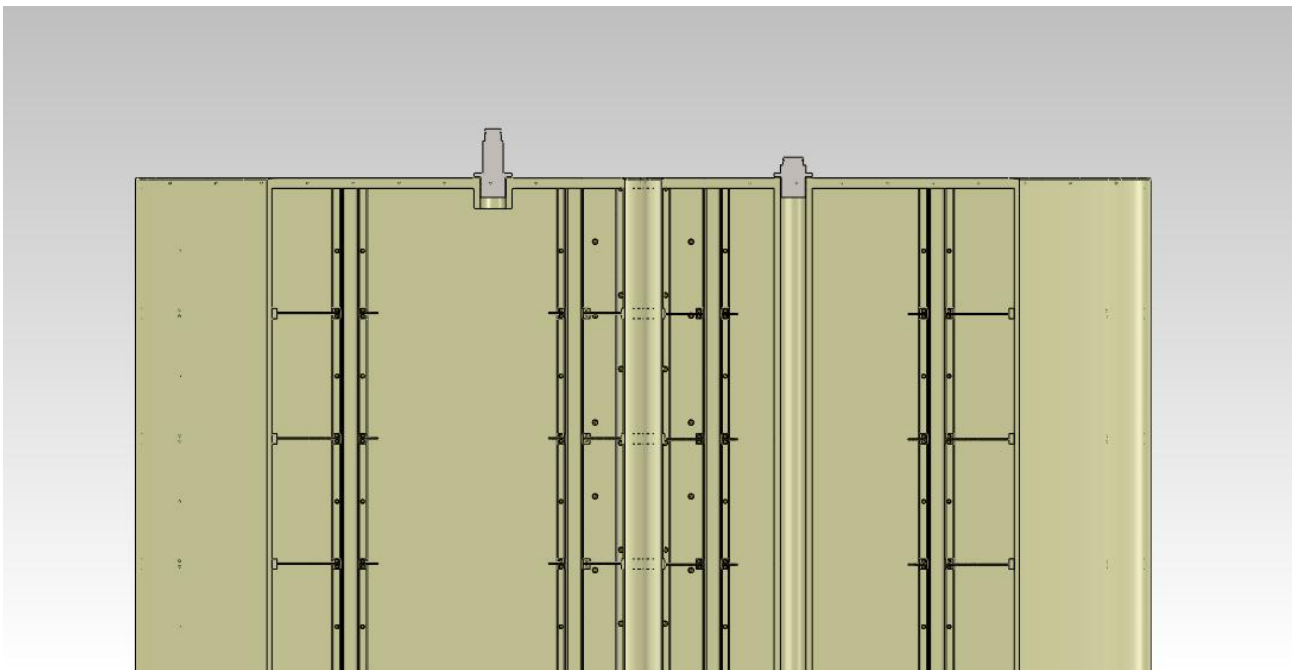
La soluzione che si vuole adottare, ovvero l'assenza del palo di sostegno centrale per il rotore, fa sì che siano le pale stesse a diventare componenti strutturali e portanti dell'intera struttura, per tale ragione il mezzo profilo relativo alla parte esterna della pala è stato realizzato con un'anima interna costituita da un tubo in alluminio (Fig. 3.3.10, Fig. 3.3.11) che la attraversa completamente per far sì che gran parte del carico venga scaricato su di essa e non sulla struttura della pala. Tale tubo presenta un diametro interno di 50 mm e un diametro esterno di 75 mm, nel seguito ne verrà enunciato il dimensionamento.

I perni utilizzati per sostenere le pale e per orientarle nel loro movimento di apertura, sono collegati alle pale mediante una filettatura interna all'anima dei mezzi profili, ogni perno presenta due superfici spianate per consentirne l'avvitamento mediante una semplice chiave inglese. Risultano però diversi a seconda del profilo alare considerato, infatti saranno lunghi e di diametro limitato quelli corrispondenti ai profili (peso circa 1,6 kg cadauno) collegati ai sistemi di apertura, in quanto devono essere facilmente agganciabili e non devono sopportare carichi strutturali; corti e tozzi (peso circa 1,2 kg cadauno) quelli relativi ai profili che invece sostengono la struttura ( Fig. 3.3.10)

I perni che a loro volta sono collegati con i cuscinetti relativi al sistema di apertura, sono realizzati in acciaio inossidabile per non ossidarsi durante la vita utile dell'aerogeneratore (sono sottoposti agli agenti atmosferici) ma soprattutto per sopportare meglio il peso della struttura e la forza centrifuga che si scarica su di essi durante il funzionamento dell'aerogeneratore.



*Fig.3.3.9: Vista in trasparenza della pala in cui ne sono ben visibili le strutture interne ed in particolare l'anima tubolare della semipala di destra.*



*Fig. 3.3.10: Sezione della pala, notare il sistema di rivettamento dei componenti*

Per accoppiare i due profili viene utilizzata una cerniera lunga 2,5 m che è stata alloggiata nella parte interna dei due semi profili palari per non avere interazioni fluidodinamiche con la vena fluida che deve investire il rotore. E' realizzata in acciaio inossidabile, pesa 22 kg per ogni pala assemblata e viene anch'essa collegata tramite rivettatura.

I profili per quanto detto presentano due masse diverse, quello con l'anima pesa 54,8 kg, mentre quello senza 39 kg. Una coppia di profili assemblati, considerando anche il peso dei componenti ausiliari in acciaio come i perni e le cerniere viene a pesare nel complesso circa 124 kg, i pesi analizzati sono fondamentali perché sono alla base del successivo dimensionamento del sistema di avviamento.

#### **3.3.3 LA FORMA DEL ROTORE**

Come si è visto nel calcolo della potenza erogata dalla turbina si è impostato che il rotore deve presentare le seguenti dimensioni:

- altezza utile delle pale : 10 m;
- raggio del rotore: 5 m;

Per quel che riguarda le pale si è impostato:

- numero di pale per livello: 3;
- corda della pala: 1 m;
- altezza singola pala: 2,5 m.

Il rotore (Fig. 3.3.11) perciò sarà costituito da quattro livelli di 2,5 m ciascuno. Le pale devono essere 3 per livello, quindi la forma dei pali di sostegno sarà ovviamente quella di un triangolo.

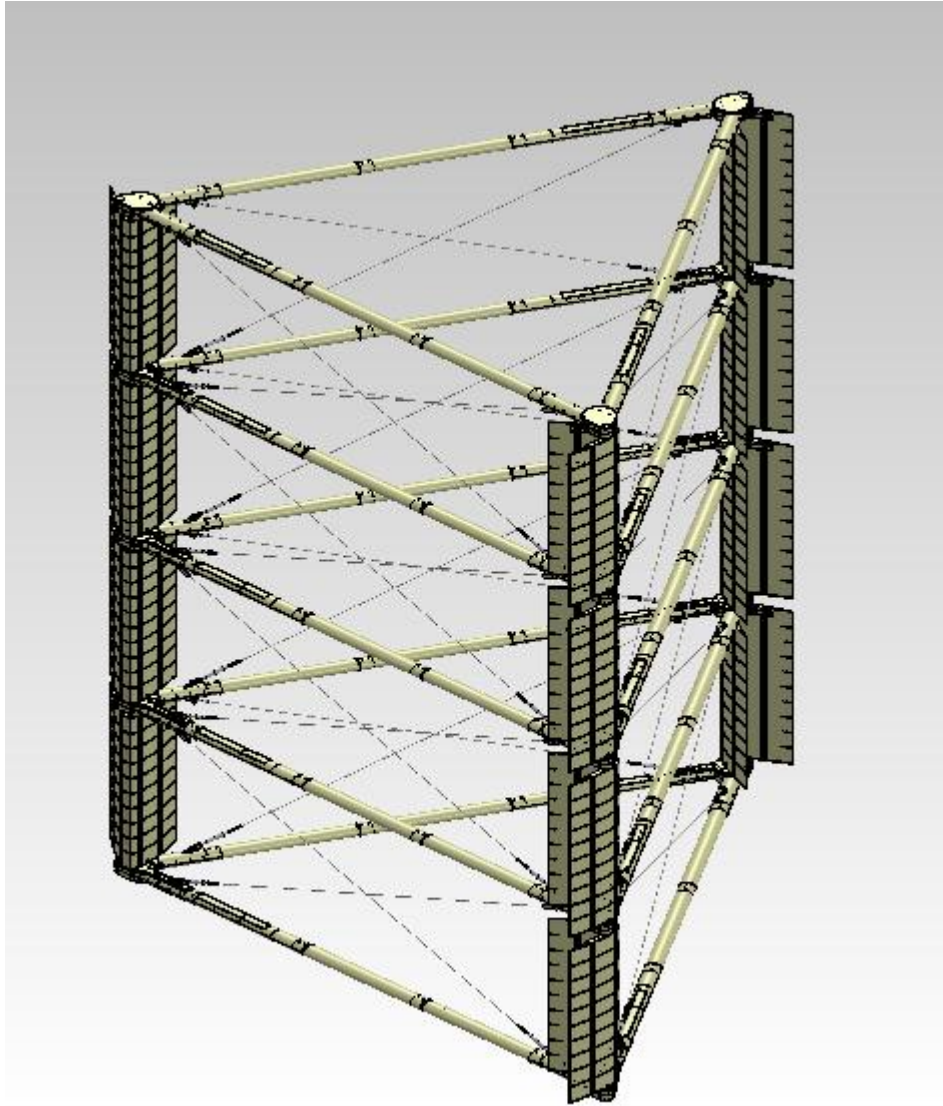
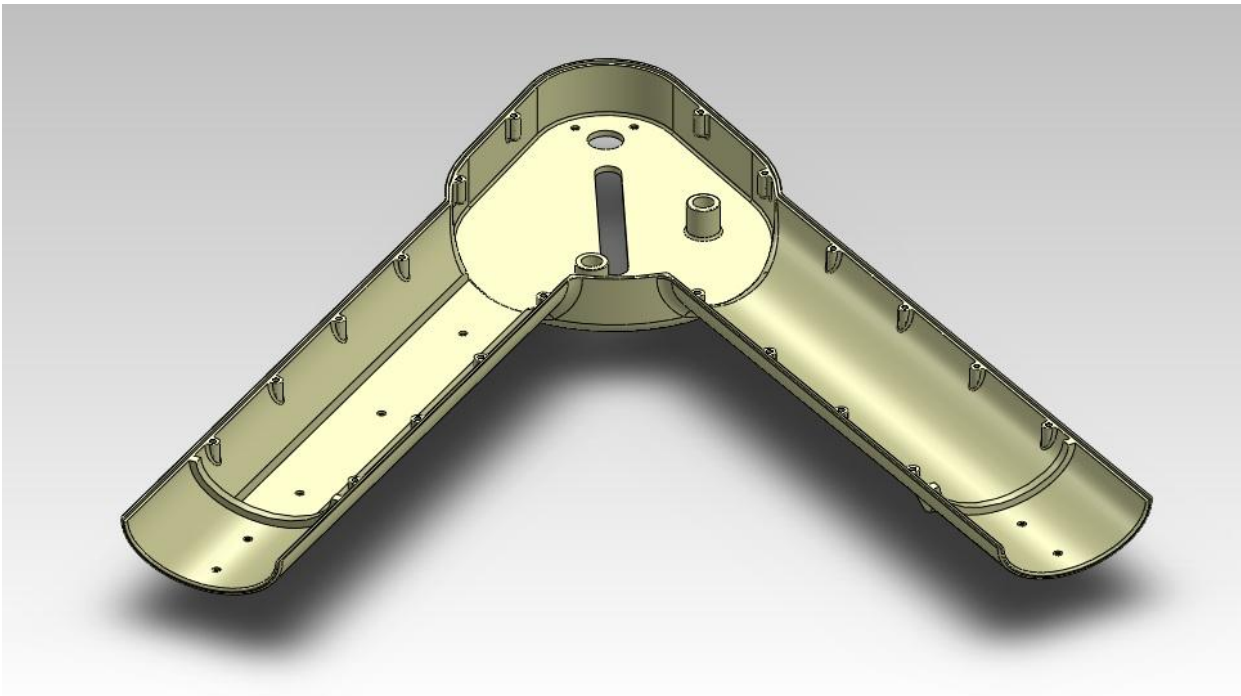


Fig. 3. 3.11: Il rotore dimensionato

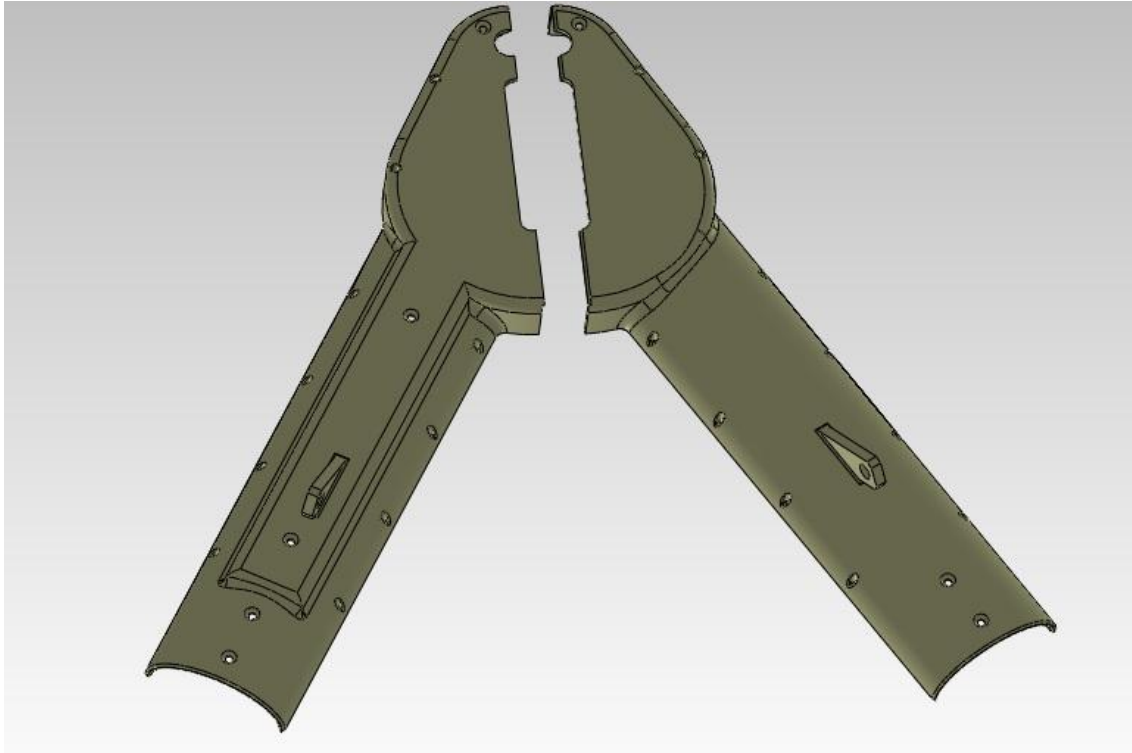
Per collegare i bracci si è pensato di adottare dei componenti di forma opportuna ottenuti per fusione, che mediante l'accoppiamento con viti tenessero il tutto assemblato. Questi componenti non sono stati pensati tutti uguali per il rotore, infatti, quelli inferiori sono stati realizzati in un sol pezzo (Fig. 3.3.12), mentre quelli superiori sono stati divisi in due parti (Fig. 3.3.13), per diversi motivi: tale configurazione permette il montaggio del meccanismo di apertura delle pale anche a rotore assemblato e consente di poter effettuare operazioni di manutenzione ai vari meccanismi, infatti se non fossero divisi in due, la pala che si trova immediatamente sopra impedirebbe l'apertura della giunzione. Come si può notare dalla figura 3.3.12, una faccia è stata spianata mediante fresatura per consentire l'alloggiamento della guida fissa. Al centro sono presenti diversi fori, i due in alto servono per bloccare l'alloggiamento dei cuscinetti, quelli con il profilo rialzato contengono i perni (accoppiati con interferenza) che supportano il meccanismo di apertura, l'asola è stata realizzata per consentire la traslazione del perno solidale alla pala. Tutti i fori rimanenti sono tutti quelli filettati per consentire l'accoppiamento.



*Fig. 3.3.12: Componente inferiore che consente la giunzione dei bracci*

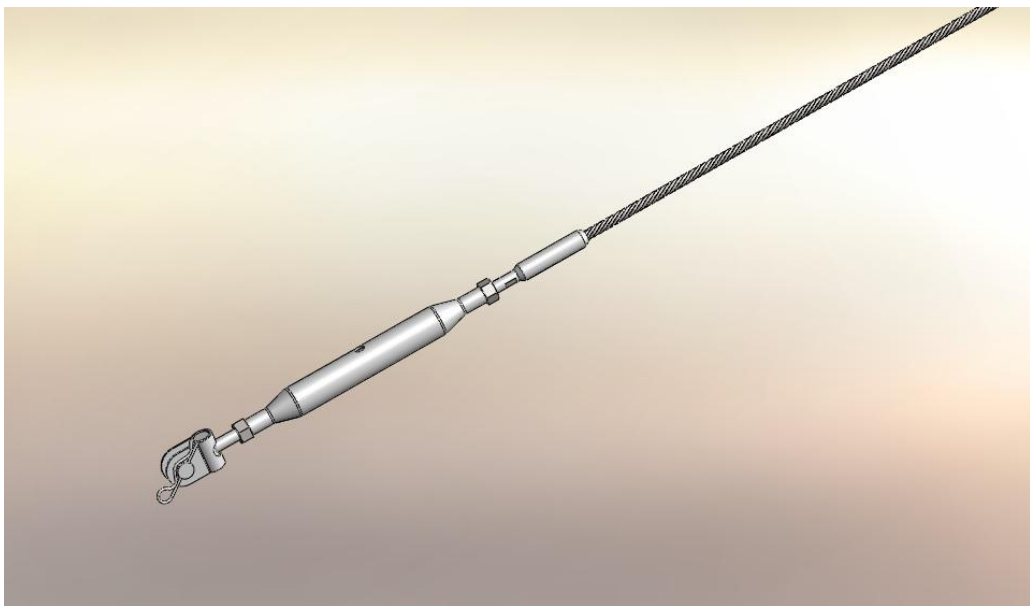
Ad entrambi i componenti, sia quelli inferiori che quelli superiori, sono state saldate delle piastre opportunamente sagomate per consentire l'alloggiamento dei perni dei tiranti, ciò lo si può vedere bene nella figura 3.3.14.

Occorre sottolineare che a loro volta gli ultimi componenti in cima al rotore e in fondo sono diversi dagli altri, infatti i primi non necessitano il fatto di essere divisi in due e perciò sono stati realizzati in un sol pezzo, i secondi siccome sono accoppiati con il componente che supporta i generatori sono stati irrobustiti e dotati di quattro fori filettati per l'accoppiamento.



*Fig. 3.3.13: Componenti superiori che consente la giunzione dei bracci*

Infine per irrobustire la struttura si è fatto un largo impiego di tiranti di tipo nautico (Fig. 3.3.16), realizzati con una fune spiroidale avente un diametro di 14 mm. Come si può notare dalla tabella (Fig. 3.3.17), tale fune resiste fino a ben 180 KN.



*Fig. 3.5.16: Particolare di uno dei tiranti utilizzati per irrobustire la struttura.*

CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

DIAMETRO		Sezione metallica mm <sup>2</sup>	Peso Kg/m	CARICO DI ROTTURA minimo	
Ø Fune	Ø Filo esterno			Resistenza 1770 N KN	Resistenza 180 Kg/mm <sup>2</sup> Kg
4	0,80	10	0,08	15	1.528
5	0,98	14	0,12	23	2.343
6	1,18	21	0,17	33	3.362
7	1,38	29	0,23	46	4.687
8	1,59	38	0,31	61	6.226
9	1,77	47	0,38	75	7.642
10	1,98	59	0,48	94	9.578
11	2,15	70	0,56	111	11.310
12	2,35	83	0,67	132	13.450
13	2,54	99	0,79	155	15.794
14	2,74	112	0,91	180	18.340
15	2,94	130	1,06	207	21.093
16	3,13	148	1,19	235	23.946

Fig. 3.3.17: Catalogo “Metalcorde”, da cui è stata scelta la fune per i tiranti



### 3.4 IL SISTEMA DI AVVIAMENTO

E' stato già accennato nei capitoli precedenti come il maggior difetto, che ha impedito fino ad ora che le turbine Darrieus fossero sufficientemente concorrenziali sul mercato rispetto le turbine ad asse verticale, sia l'incapacità delle stesse di raggiungere automaticamente una velocità tale per cui si possa sviluppare una portanza che autoalimenti il moto di rotazione della turbina senza ricorrere a soluzioni che sfruttano l'energia elettrica .

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.

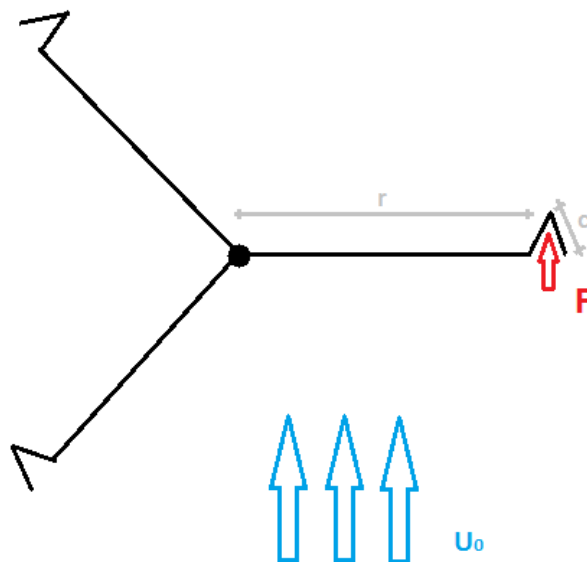


Fig.3 .4.1: Schema del principio che sta alla base del meccanismo di avviamento

Si è studiato così un particolare sistema completamente automatico (Fig.3.4.1, 3.4.2, 3.4.3) costituito da due mezzi profili alari NACA incernierati nel bordo di attacco, tale sistema permette di avere un funzionamento a resistenza nelle fasi iniziali che poi si trasforma in un funzionamento a portanza a regime. Infatti in avviamento i due mezzi profili si vuole che siano totalmente aperti, per avere una notevole superficie intercettata



dal vento, in questo modo le fasi iniziali della rotazione della turbina sono garantite dalla forza resistente.

All'aumentare della velocità di rotazione, i due mezzi profili invece devono chiudersi facendo in modo che la pala assuma la forma classica del profilo NACA 0018 adottato, garantendo così un funzionamento non più per resistenza ma per portanza.

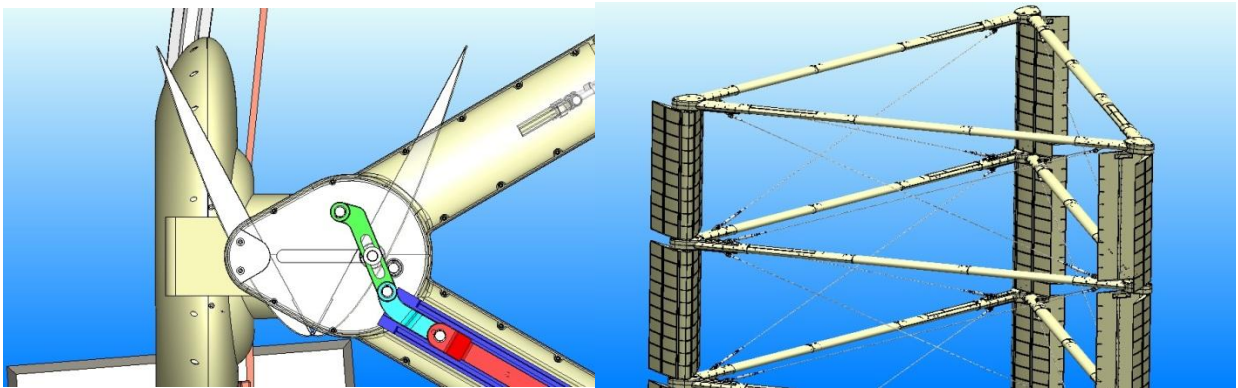


Fig. 3.4.2: Funzionamento iniziale, con pale aperte dalla forza centripeta data dalle molle

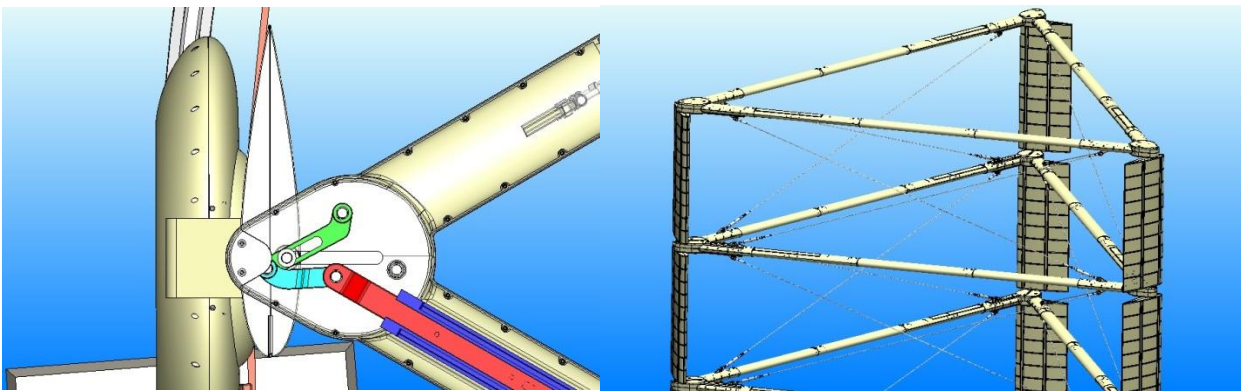
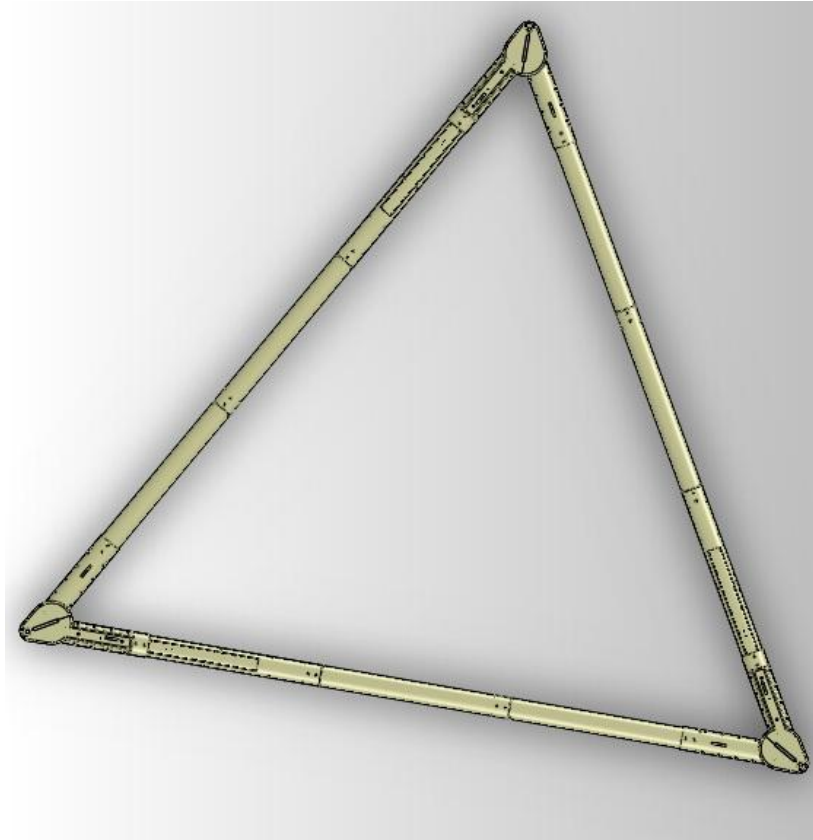
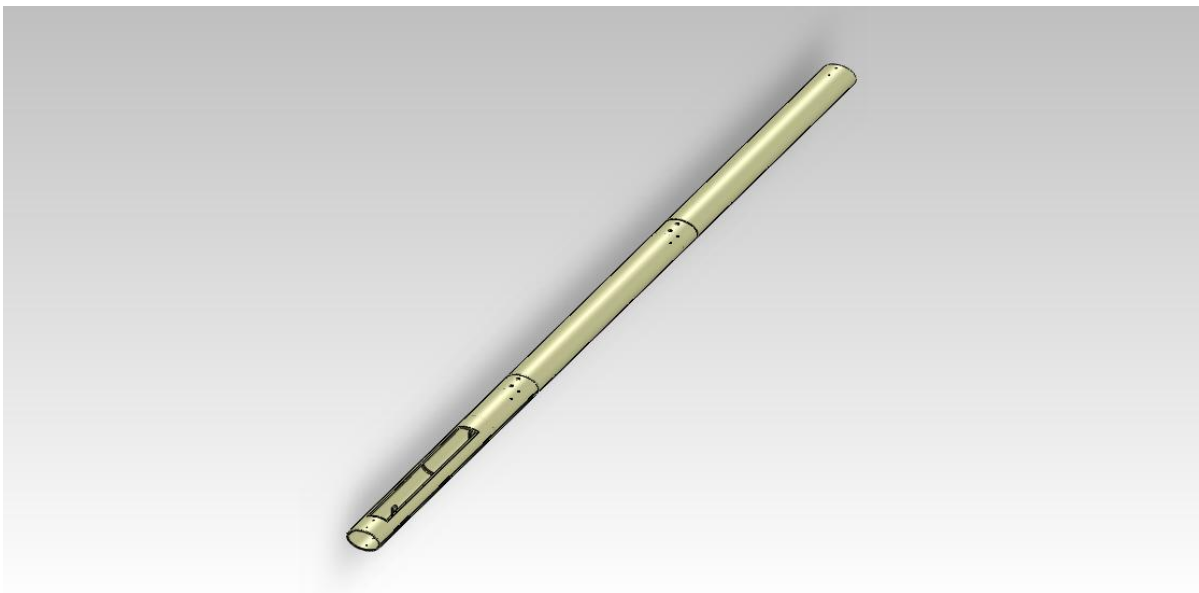


Fig. 3.4.3: Funzionamento a regime, con pale chiuse dalla forza centrifuga agente sulle pale

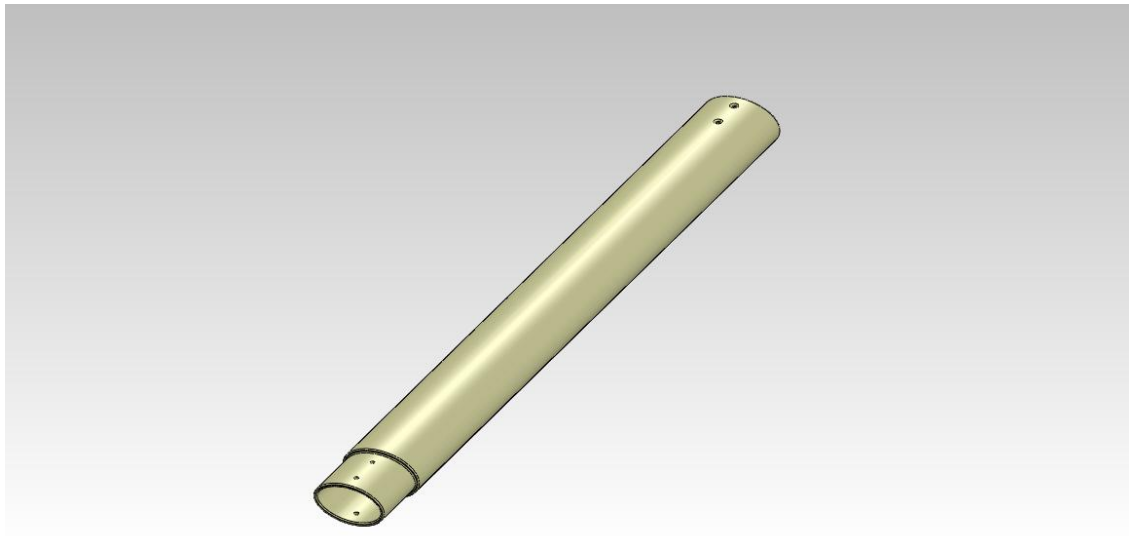
Risulta necessario ricordare che il rotore non presenta il palo centrale, quindi ogni meccanismo utilizzato per la movimentazione del sistema di avviamento è stato posto all'interno dei bracci di collegamento delle pale che non sono totalmente radiali come nella soluzione precedente, ma presentano un'angolo di  $60^\circ$  (Fig. 3.4.4). Per di più, per soddisfare i vincoli di progetto, ogni singolo palo (Fig. 3.4.5) è stato pensato come l'unione, mediante viti, di tre altri sottocomponenti, per consentirne così un più facile trasporto (Fig. 3.4.6).



*Fig. 3.4.4: Uno dei piani del rotore con la caratteristica forma a triangolo*

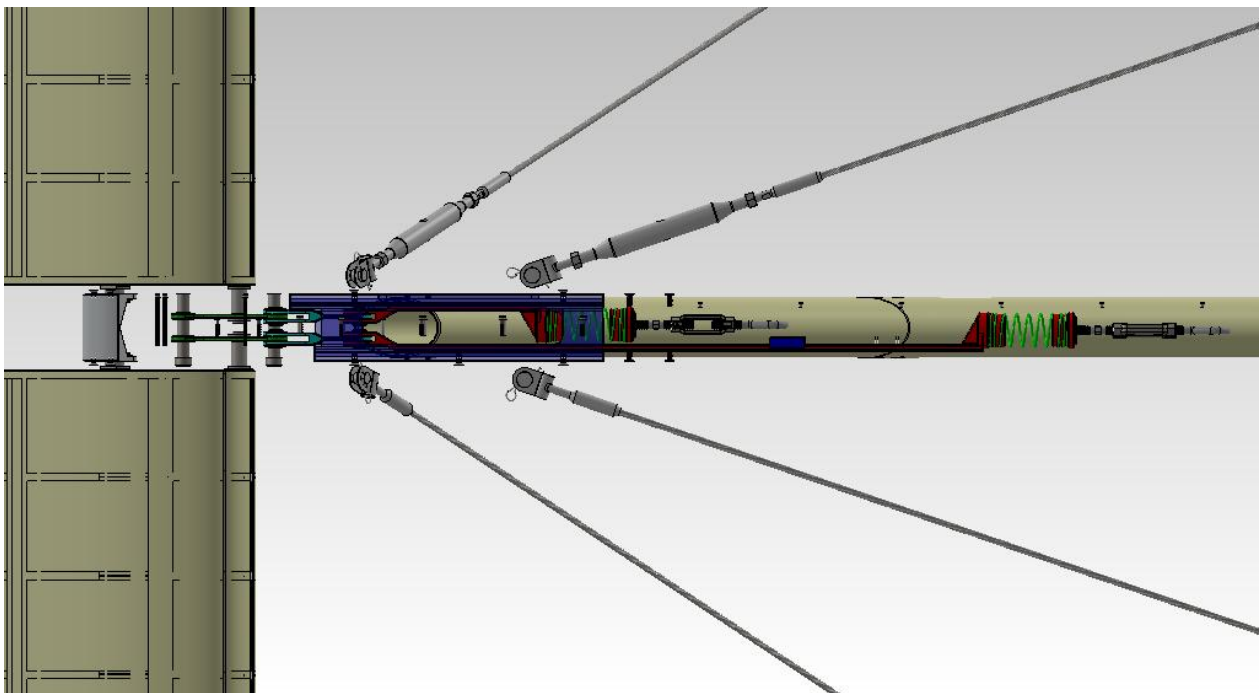


*Fig.3.4.5: Braccio di collegamento delle pale*

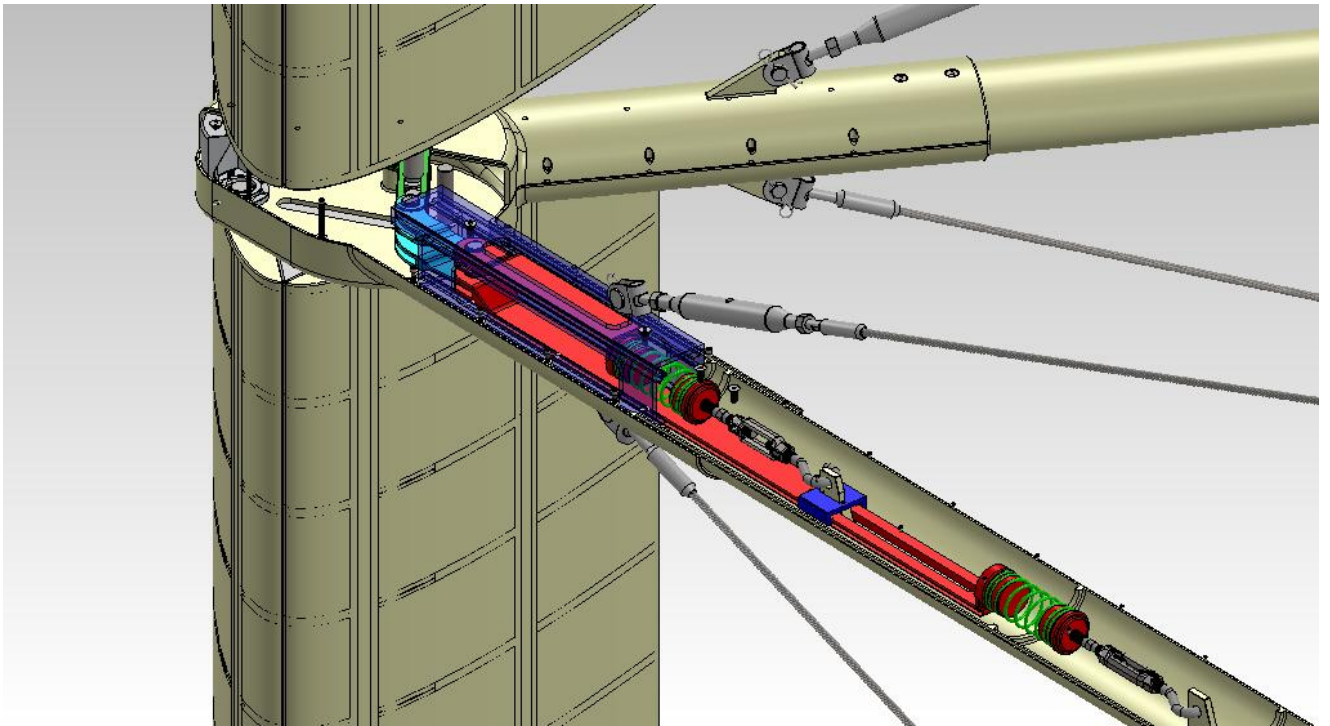


*Fig. 3.4.6: Uno dei tre componenti del braccio*

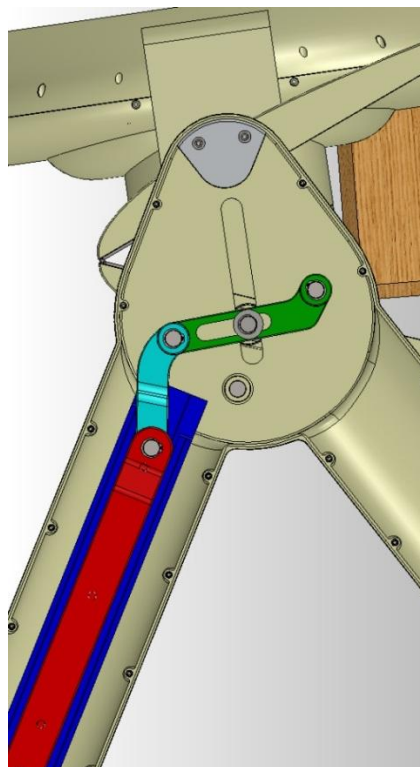
Il meccanismo interno ai bracci (Fig. 3.4.7, Fig. 3.4.8, Fig. 3.4.9), realizzato per ogni mezzo profilo palare, fornisce attraverso delle molle opportunamente dimensionate una forza in direzione centripeta, quindi opposta alla forza centrifuga che si genera a causa dell'accelerazione del rotore



*Fig. 3.4.7: Il meccanismo di apertura delle pale, vista laterale*



*Fig.3.4.8: Sistema di apertura delle pale*



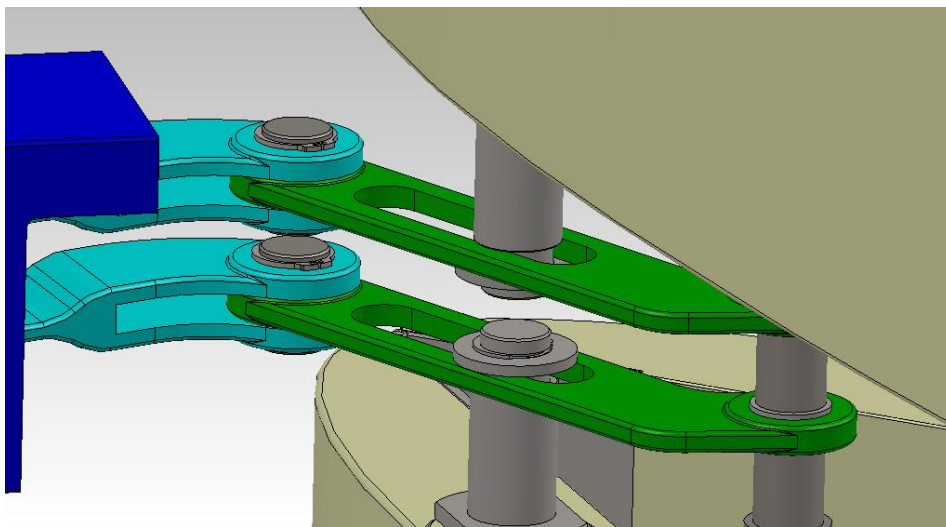
*Fig.3.4.9: Sistema di apertura delle pale, vista superiore*

Tale forza dovrà essere calibrata in modo tale che si ottenga la chiusura dei profili nei tempi e nei modi voluti, quindi quando la velocità è sufficiente per generare portanza,

altrimenti non si raggiungerebbero i rapporti di TSR adeguati per produrre la potenza per cui la turbina è stata progettata.

Il meccanismo per ogni pala è costituito da quattro guide, due fisse e due mobili, quattro bielle, due molle e due tenditori.

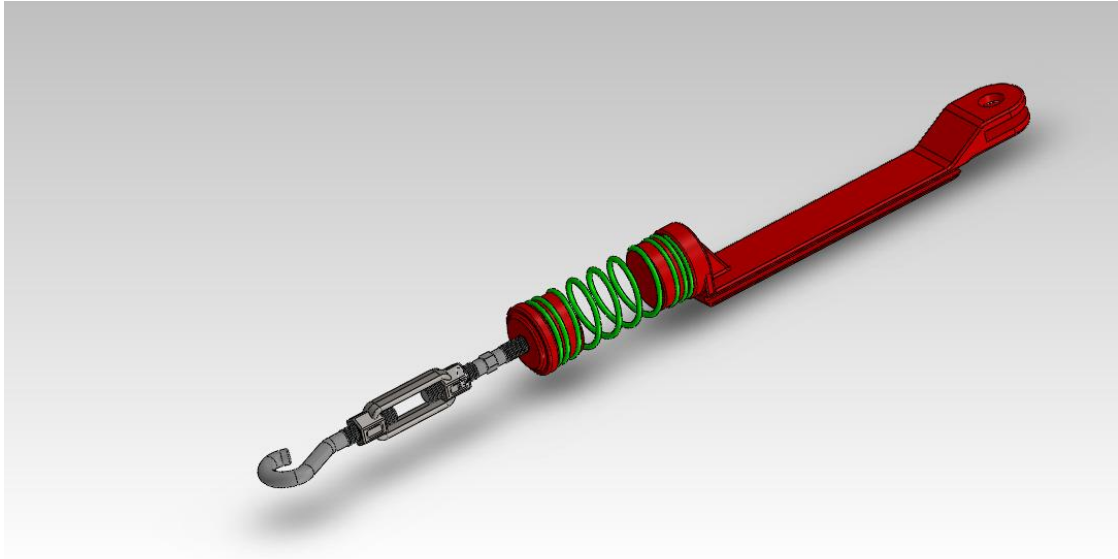
Le guide fisse sono fissate mediante viti ai bracci di sostegno delle pale, su di esse traslano le guide mobili che attraverso le due bielle permettono il movimento dei mezzi profili. La prima biella, che nel mezzo presenta una cava per la traslazione del perno solidale con il mezzo profilo alare, risulta ad un'estremità incernierata ad un perno solidale alla struttura di sostegno delle pale, mentre all'altra estremità è accoppiata alla seconda biella che a sua volta è collegata alla guida mobile ( Fig. 3.4.10).



*Fig. 3.4.10: Particolare in cui si vedono le due bielle mobili e il sistema di bloccaggio di tutti i perni mediante semplici anelli elastici*

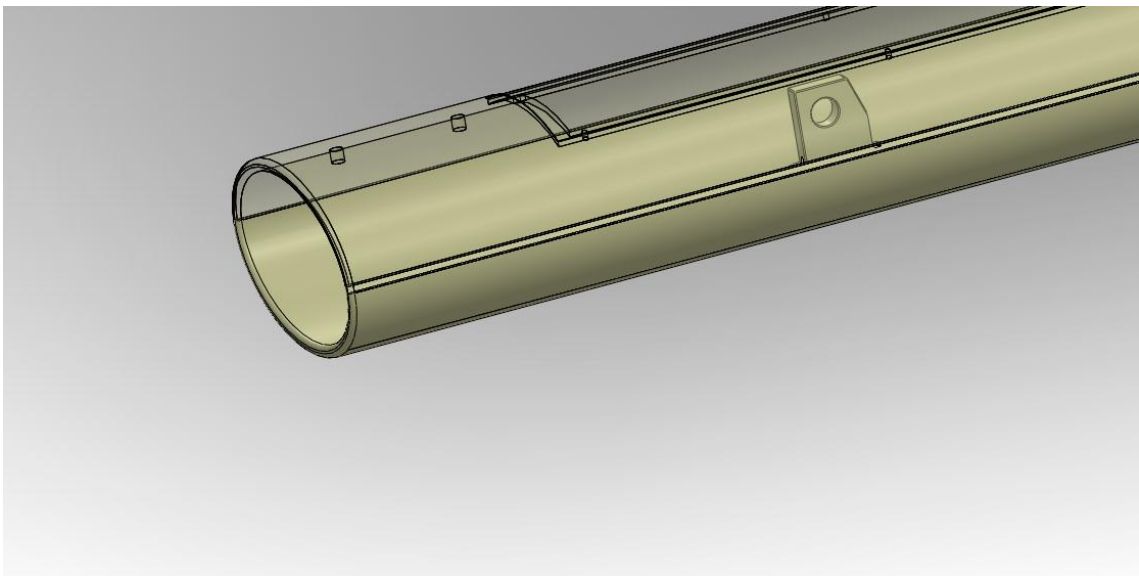
Le due guide mobili che agiscono per ogni mezzo profilo sono accoppiate alle estremità con le due molle che forniscono la forza centripeta necessaria (Fig. 3.4.11). Il precarico delle molle viene regolato attraverso dei semplici tenditori che sono collegati ai bracci di sostegno. Il perno filettato di collegamento tra il tenditore e la guida mobile è stato dotato di un inserto esagonale per consentirne il montaggio e il bloccaggio in fase di regolazione del precarico.





*Fig.3.4.11: Guida mobile inferiore con relativo sistema di regolazione del precarico*

L'ultimo dei tre sotto-componenti che costituiscono il braccio di sostegno (Fig. 3.4.12), quello che contiene il meccanismo di apertura, è stato pensato come l'unione di dei pezzi distinti, questo per favorirne il montaggio su quello inferiore dei vari meccanismi. Il pezzo superiore (Fig. 3.4.13) è stato dotato invece di un coperchio fissato con viti, che può essere aperto in caso di operazioni di manutenzione o per regolazione del precarico.



*Fig. 3.4.12: Suddivisione in due parti del primo componente dell'albero di sostegno*

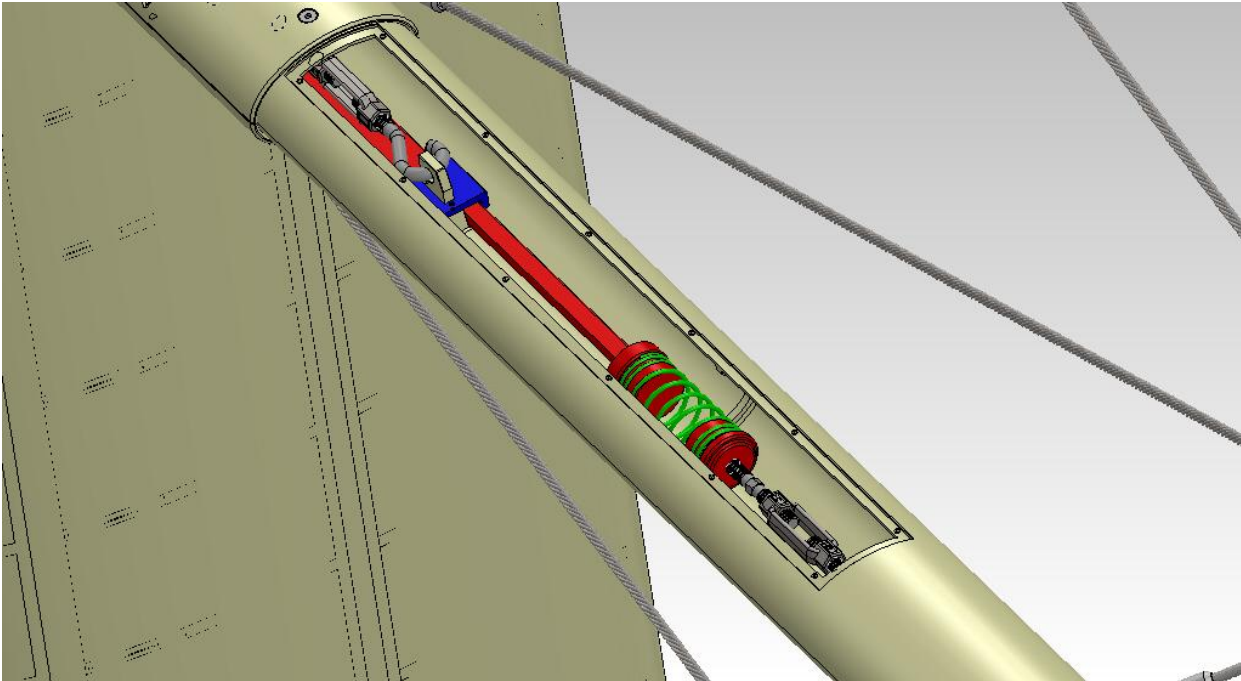


Fig.3.4.13: Pezzo superiore del primo componente a cui è stato temporaneamente rimosso il coperchio per operazioni di manutenzione.

### 3.4.1: IL DIMENSIONAMENTO DELLE MOLLE

La molla è l'elemento principale del sistema di avviamento e la sua scelta è di primaria importanza per la definizione del transitorio di avviamento della turbina Darrieus. Un errato calcolo delle molle o dei precarichi, sia in eccesso, sia in difetto, comporta una chiusura anticipata o una non-chiusura dei profili, e in entrambi i casi l'effetto è una diminuzione della portanza, e quindi della coppia, generata dal rotore.

Le molle di trazione sono state dimensionate, partendo dalla conoscenza della forza centrifuga a cui devono opporsi.

Gli elementi che danno contributo alla forza centrifuga agente sulla molla sono:

- il mezzo profilo palare che può traslare:  $m_p = 39,2 \text{ Kg}$ ;
- le due guide mobili:  $m_{G1} = 6.04 \text{ Kg}$ ,  $m_{G2} = 2.86 \text{ Kg}$ ;
- si considerano anche le due bielle mobili:  $m_b = 0.576 \text{ Kg}$  (cadauna);
- i quattro perni di collegamento tra le guide e le bielle:  $m_{pr} = 0,098 \text{ Kg}$  (cadauno);

Quindi la massa totale che da una componente centrifuga da equilibrare è:

$$M_C = m_p + m_{G1} + m_{G2} + 2 m_b + 4 m_{pr} = 49,6 \text{ Kg} \approx 50 \text{ Kg}$$

Le masse sono state calcolate attraverso la funzione "proprietà di massa" del software "Solid Works 2011".

Il diametro massimo che si può tollerare per la molla è di 80 mm, poiché il sistema deve essere alloggiato all'interno del braccio di sostegno del rotore.

Supponendo di avere la velocità del vento a regime cioè pari a 16 m/s, per raggiungere il TSR desiderato di 3 la velocità tangenziale dei profili deve valere 48 m/s. Tuttavia dalle relazioni teoriche sulle Darrieus è noto come si deve generare portanza a partire da un TSR di 1.5, quindi la velocità a cui il meccanismo deve cominciare a muoversi è 24 m/s.

Sulla base di queste considerazioni la forza centrifuga vale:

$$F_c = M_c \omega^2 r = M_c \frac{v^2}{r} = (50) \frac{24^2}{5} = 5760 \text{ N}$$

Tale forza è totalmente radiale, ma vista la geometria adottata la si può equilibrare solamente con una forza inclinata rispetto ad essa di 30°, perché non ci sono bracci di collegamento radiali entro cui poter alloggiare il meccanismo di apertura, perciò occorrerà fornire una componente di entità maggiore ( $F_{cf}$ ).

$$F_{cf} = \frac{F_c}{\cos 30^\circ} = \frac{5760}{\cos 30^\circ} = 6651 \text{ N}$$

La forza ( $F_{cf}$ ) appena calcolata è da distribuire su due molle, una montata nella parte superiore della pala e una montata nella parte inferiore.

Il sistema sopra descritto lavora quindi in parallelo. Nell'esempio generale sottostante (Fig 3.4.14), si mostra come si distribuiscono le forze al variare delle rigidità.

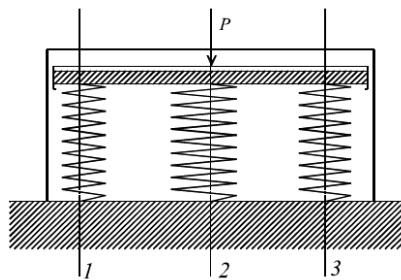


Fig. 3.4.14: Schema di un sistema di molle in parallelo



### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

Ipotizzando che le rigidezze siano  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , si vuole trovare la rigidezza di una molla equivalente alle tre. La freccia totale è la stessa per ogni singola molla, mentre ogni molla sopporta una parte del carico  $P$ . Per cui si ha, ricordando l'espressione della rigidezza:

$$P_1 = f k_1.$$

Calcolando i carichi sulle singole molle e sommandoli si ha il carico totale:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = f k_1 + f k_2 + f k_3 = f (k_1 + k_2 + k_3)$$

per la molla equivalente deve valere  $P = f k_e$  da cui è possibile ricavare la rigidezza equivalente che vale:

$$k_e = k_1 + k_2 + k_3$$

Nel nostro caso, essendo  $k_1 = k_2 = k$ , si può ragionare come se ci fosse una singola molla sollecitata dalla metà della forza centrifuga totale ( $F_{Cf}$ ).

Simbolo	Numero materiale o riferimento DIN	Valori di resistenza		Tipo	Applicazioni
		Resistenza a trazione <sup>1)</sup> $R_{m,N}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Allungamento a rottura $A_5$ [%]		
A	DIN 17223 T1, T2	1520...1750	40	Filo per molle d'acciaio	Fino a 10 mm Ø; per sollecitazione di fatica (che capita di rado) e sollecitazione statica bassa
B	DIN 17223 T1, T2	1760...1970	40	Trafilato (trattamento brevettato)	Fino a 20 mm Ø; per sollecitazione statica media e sollecitazione di fatica ridotta
C	DIN 17223 T1, T2	1980...2200	40	Non legato con	Fino a 20 mm Ø; per sollecitazione statica elevata di molle di compressione, trazione, torsione e a tazza
D	DIN 17223 T1, T2	1980...2200	40	0,4-1% di C	Fino a 20 mm Ø; anche per sollecitazione di fatica
FD	DIN 17223 T1, T2	1720...1890	45	Acciaio per molle trafileto e con bonifica finale in olio	Fino a 17 mm Ø; molle agenti nel campo della resistenza a fatica
VD	DIN 17223 T1, T2	1670...1770	50		Fino a 10 mm Ø; filo per molle valvole specifico per molle difficili da avvolgere

Fig. 3.4.15: Tabella DIN 17221- 17225

Dalla tabella DIN 17221- 17225 (Fig. 3.4.15) è stato scelto come materiale per la molla l'acciaio DIN 17223 classe C, di cui sono riportate di seguito le principali caratteristiche meccaniche. E' un acciaio che può essere utilizzato per la costruzione di molle con un filo fino a 20 mm, è ottimo sia per l'utilizzo in caso di sollecitazione statica elevata di molle di compressione, trazione, torsione e a tazza.

In seguito a tutte le considerazioni esposte in precedenza, i dati in ingresso per il dimensionamento della molla sono:

- $\frac{F_{cf}}{2} = 3325,5 \text{ N};$
- $R_m = 1900 \text{ N/mm}^2;$
- $D_{e \text{ LIM}} = 80 \text{ mm}.$

E' stata utilizzata la procedura standard per il dimensionamento delle molle elicoidali a trazione, per determinare le dimensioni ottimali sono state fatte diverse iterazioni, fino ad arrivare al valore per cui la tensione calcolata è inferiore a quella ammissibile.

Viene di seguito riportata l'iterazione conclusiva:

Viene fissato per il filo un diametro di  $d = 10 \text{ mm}$  e per la molla un diametro esterno di  $D = 70 \text{ mm}$ .

Si calcola il fattore di avvolgimento  $c$ :

$$c = \frac{2R}{d} = \frac{D}{d} = \frac{70}{10} = 7$$

Si entra con tale rapporto nella tabella sottostante (Fig.3.4.16) nelle ascisse e si ricava il fattore di correzione delle tensioni  $\lambda$  nelle ordinate che in questo caso è circa 1,18.

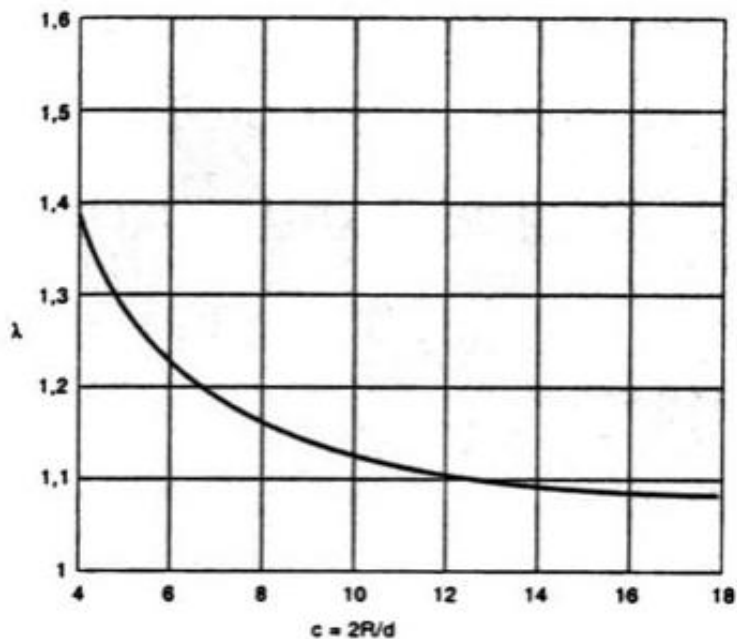


Fig.3.4.16: Tabella per la determinazione del coefficiente  $\lambda$

### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

Ora si possono calcolare le tensioni che agiscono sulla molla e si possono confrontare con quelle ammissibili. Ovviamente deve valere  $\tau \leq \tau_{amm}$ .

$$\tau_{amm} = 0.45 S_U = 0.45 * 1900 = 855 \text{ MPa}$$

$$\tau = \lambda \tau_n = \lambda \frac{16 F R}{\pi d^3} = 1.18 \frac{16 * 3325.5 * 35}{\pi 10^3} = 755 \text{ MPa}$$

$$CS = \frac{\tau_{amm}}{\tau} = \frac{855}{755} = 1.13$$

Sicuramente il valore per il coefficiente ricavato non è altissimo, però è anche vero che le molle non sono fortemente sollecitate, perciò è ritenuto accettabile.

Si sceglie quindi dal catalogo per molle a trazione “Durovis” (Fig. 3.4.17):

	d	De	Dh	Lo	Lk	R	Ln	sn	Fo	Fn	No art.
🛒	10.00	50.00	20.00	270.00	210.00	80.080	344.00	74.00	450.00	6406.00	30/1/1
🛒			25.00	320.00	260.00	64.060	413.00	93.00			30/1/2
🛒			30.00	370.00	310.00	53.390	481.00	111.00			30/1/3
🛒			35.00	420.00	360.00	45.760	550.00	130.00			30/1/4
🛒			40.00	470.00	410.00	40.040	618.00	148.00			30/1/5
🛒	60.00	60.00	25.00	340.00	260.00	32.800	485.00	145.00	350.00	5125.00	30/2/1
🛒			30.00	390.00	310.00	27.330	564.00	174.00			30/2/2
🛒			35.00	440.00	360.00	23.430	643.00	203.00			30/2/3
🛒			40.00	490.00	410.00	20.500	722.00	232.00			30/2/4
🛒			45.00	540.00	460.00	18.220	802.00	262.00			30/2/5
🛒	70.00	70.00	30.00	410.00	310.00	15.820	662.00	252.00	280.00	4271.00	30/3/1
🛒			35.00	460.00	360.00	13.560	754.00	294.00			30/3/2
🛒			40.00	510.00	410.00	11.860	846.00	336.00			30/3/3
🛒			45.00	560.00	460.00	10.550	938.00	378.00			30/3/4
🛒			50.00	610.00	510.00	9.490	1030.00	420.00			30/3/5

d = diametro filo, in mm  
 De = diametro esterno, in mm  
 Dh = diametro foro minimo, in mm  
 Lo = lunghezza libera, in mm  
 Lk = lunghezza corpo, in mm  
 R = costante in N/mm  
 Ln = lunghezza massima a carico Fn  
 sn = flessione a carico Fn, in mm  
 Fo = tensione iniziale, in Newton  
 Fn = carico massimo a Ln, in Newton

Fig. 3.4.17: Pagina del catalogo molle “Durovis” relativa ai diametri del filo pari a 10 mm

La molla viene scelta in funzione dei parametri impostati (e dimostratisi accettabili) ovvero il diametro del filo e della molla.

Risultano così definiti i valori della forza massima sopportabile per la molla e del suo massimo allungamento. Per quanto riguarda quella per la quale si è optato, il carico massimo sopportabile è di 4271 N, che è superiore rispetto al valore calcolato di 3325,5N ovvero il valore massimo a cui sarà sottoposta nel suo funzionamento.

Per verificare l'allungamento è necessario calcolare la freccia massima che si ha in esercizio  $f_{max}$ , si è imposto un numero di spire utili  $i_u$  pari a 8 e si è assunto il modulo di elasticità tangenziale  $G$  da tabella specifica pari a  $81400 \text{ N/mm}^2$ :

$$f_{max} = \frac{64 i_u F R^3}{G d^4} = \frac{64 * 12 * 3325,5 * 35^3}{81400 * 10^4} = 134,5 \text{ mm}$$

Essa è chiaramente inferiore alla differenza fra la lunghezza nella massima estensione (662 mm) e lunghezza a riposo (360 mm) indicati nel catalogo (Fig. 3.4.17) che è pari a 302mm.

Passiamo infine al dimensionamento dell'ultimo fattore incognito della molla, ovvero la rigidezza  $K$ :

$$K = \frac{F}{f} = \frac{G d^4}{64 i_u R^3} = \frac{81400 * 10^4}{64 * 12 * 35^3} = 24,72 \frac{N}{mm}$$

Si riporta di seguito (Fig. 3.4.18) il disegno della molla effettuato in una posizione priva di carico.

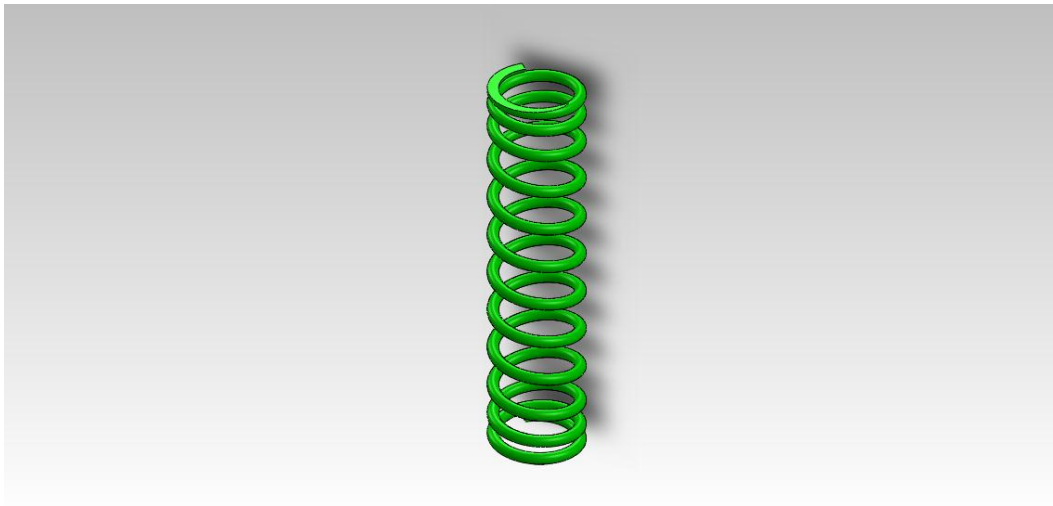


Fig. 3.4.18: La molla a trazione dimensionata

### 3.5 LE GUIDE

#### 3.5.1 LE GUIDE MOBILI E IL SISTEMA DI REGOLAZIONE DEL PRECARICO

Le guide mobili sono quei componenti che, accoppiati ad un'estremità con le molle, traslando durante il moto, permettono alla pala di aprirsi in fase di riposo favorendo il funzionamento iniziale del sistema per resistenza. Per ogni pala sono previste due guide mobili distinte, da notare che non sono uguali (Fig. 3.5.1), perché sono state pensate con una opportuna diversa geometria per permetterle di occupare il minor posto possibile all'interno del braccio.

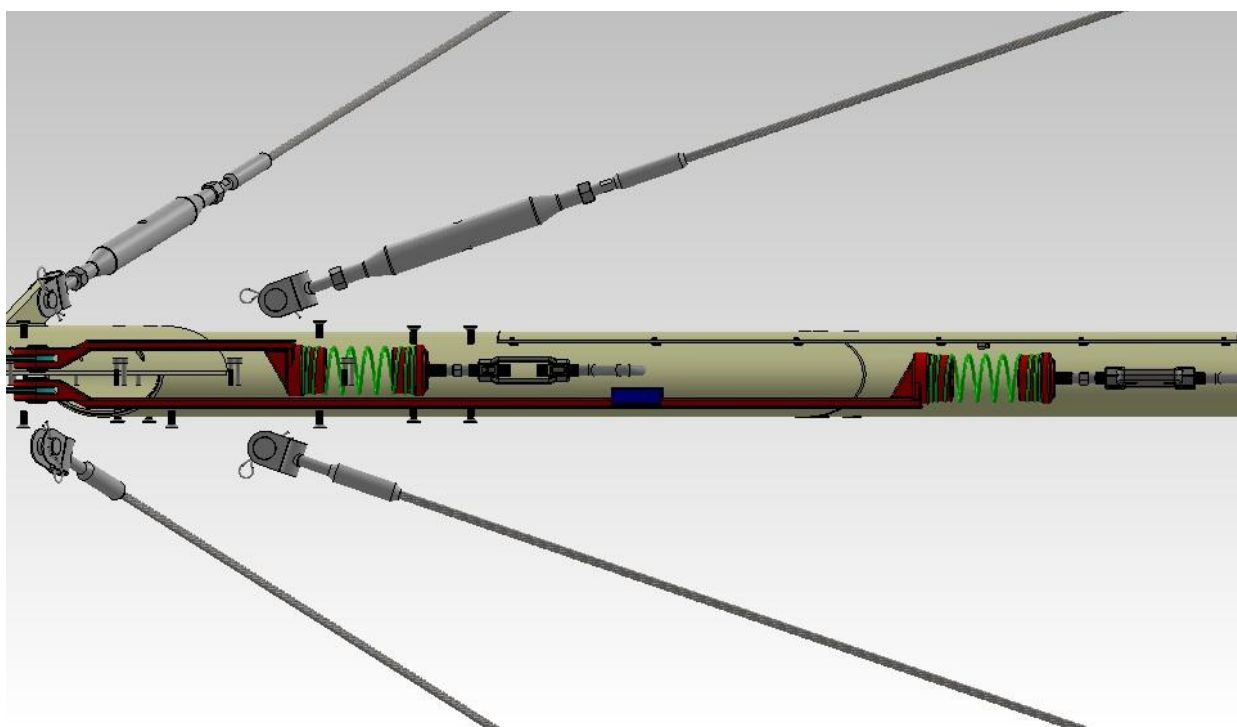
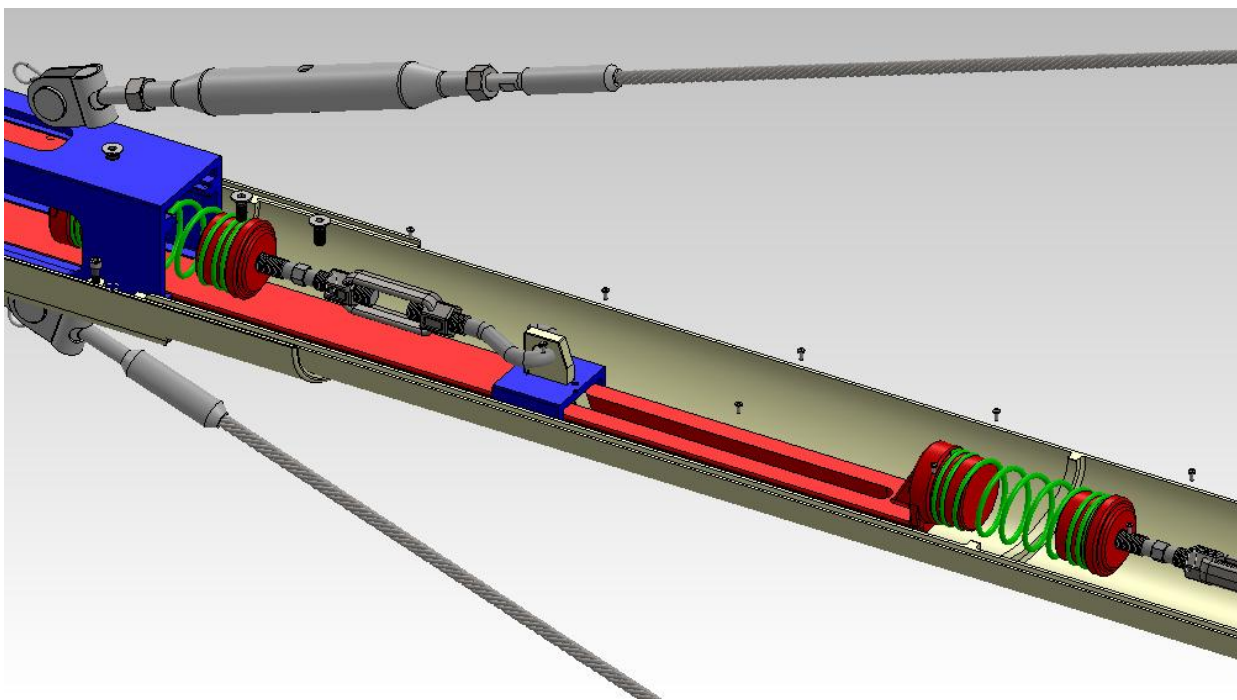


Fig. 3.5.1: Diverse geometrie delle guide mobili (in rosso)

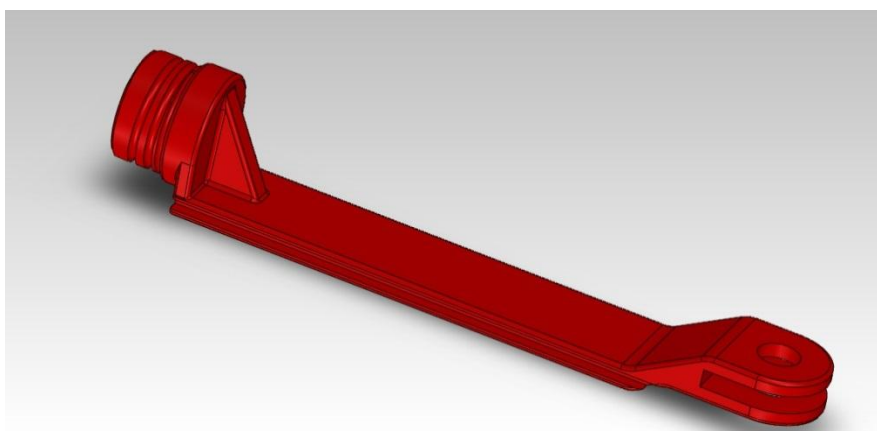
Come si può notare la guida che sta nella parte bassa del braccio, e che quindi è accoppiata con la pala nella parte sotto è molto più lunga (1610 mm) rispetto a quella sopra (510 mm), ed in più presenta una cava nel mezzo per consentire il passaggio della piastra forata solidale al pezzo sotto del braccio che serve per il bloccaggio del tenditore della guida corta (Fig. 3.5.2).



*Fig. 3.5.2: Particolare della cava realizzata nella guida mobile lunga*

Come si può notare, sempre dalla figura 3.5.2, la guida mobile lunga presenta un grande sbalzo rispetto alla guida fissa e perciò è stata aggiunta una' altra piccola guida fissa , che trova supporto nella piastra forata solidale al pezzo di braccio sotto per limitarne la flessione.

Le guide mobili (Fig. 3.5.3, Fig. 3.5.4) scorrono all'interno delle guide fisse, perciò presentano ai lati due scassi di 8x8 mm che consentono l' accoppiamento prismatico. Gli ingombri laterali sono stati definiti sempre in funzione della geometria del braccio e la massima larghezza delle guide è perciò di 60mm. Lo spessore nel tratto rettilineo risulta di 18 mm.



*Fig. 3.5.3: La guida mobile corta*

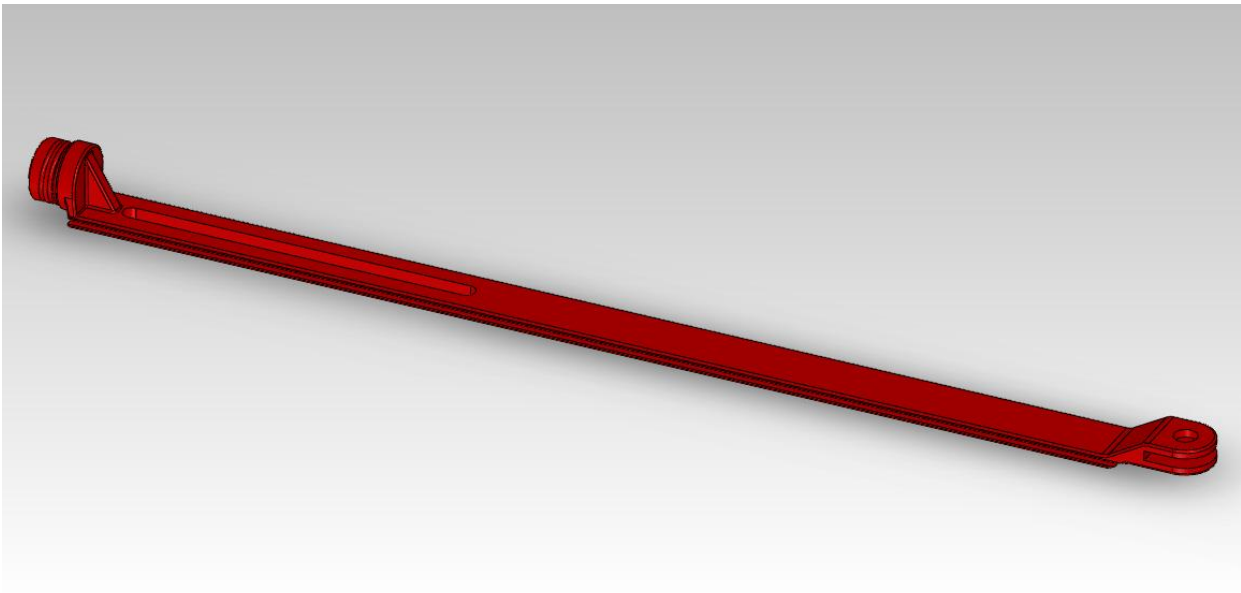


Fig. 3.5.4: La guida mobile lunga

Siccome la leggerezza dei componenti mobili è fondamentale, soprattutto per non far sì di avere molle di trazione di dimensioni enormi, per le guide mobili si è scelto come materiale l'alluminio 3.0205 (EN AW-1200).

Vengono riportate nella tabella sottostante le sue caratteristiche (Fig. 3.5.5):

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	7e+010	N/m <sup>2</sup>
Rapporto di Poisson	0.3897	N/A
Modulo di taglio	2.7e+010	N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	2700	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	350000000	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione in X		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	200000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di espansione termica	2.4e-005	/K
Conducibilità termica	204	W/(m·K)
Calore specifico	940	J/(kg·K)
Rapporto di smorzamento del materiale		N/A

Fig.3.5.5: Caratteristiche dell'alluminio 3.0205 (EN AW-1200)

La corsa delle guide mobili, e quindi in seconda istanza l'apertura e la chiusura delle pale, dipendono indiscutibilmente dal precarico delle molle.

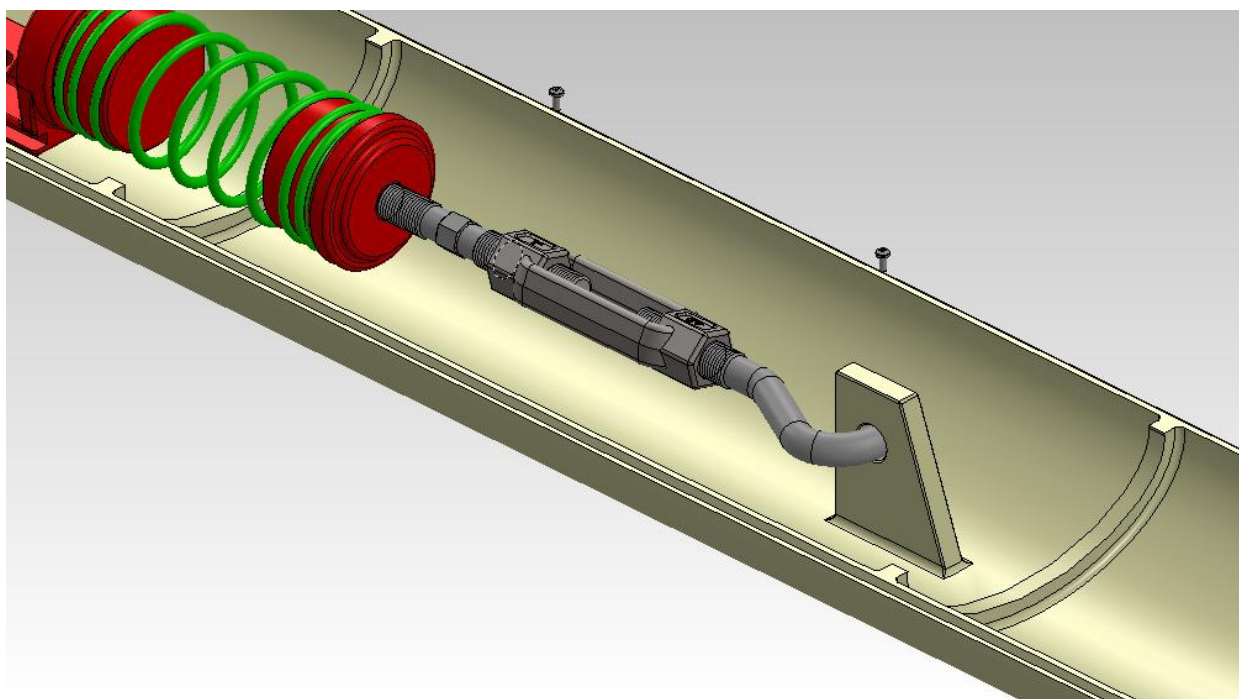
Infatti in funzione del precarico, varia l'allungamento iniziale della molla rispetto alla posizione di riposo, e di conseguenza varia anche il precarico che la forza centrifuga deve vincere per chiudere i profili e raggiungere la posizione di funzionamento a portanza.



La regolazione ottimale del precarico è fondamentale, infatti se non fosse abbastanza elevato, i due mezzi profili palari arriverebbero a battuta troppo velocemente, senza prima aver raggiunto il T.S.R. desiderato e quindi la condizione di auto-sostentamento da parte della portanza. Ciò significherebbe ottenere una potenza inferiore rispetto a quella di progetto. Se il precarico invece risulta troppo alto, il rotore non riesce a generare una sufficiente forza centrifuga per chiudere i due profili e anche in questo caso non si avrebbe la potenza di progetto.

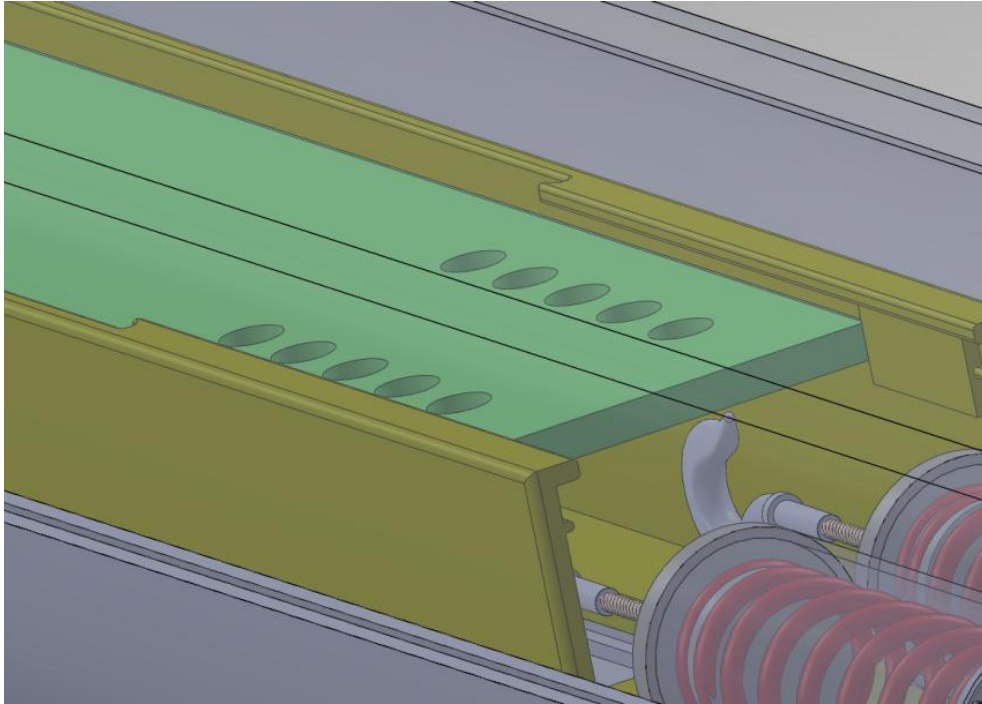
La facilità di regolazione del precarico risulta quindi fondamentale, per ottenere ciò si è deciso di utilizzare dei comuni tenditori commerciali, che si impegnano da una parte con le molle e dall'altra con i bracci di sostegno. Per effettuare la regolazione basta ruotare il corpo centrale del tenditore: se i due perni filettati si avvicinano aumenta il precarico, se si allontanano diminuisce (Fig.3.5.6).

Questa soluzione risulta più facile e immediata rispetto a quella precedentemente utilizzata dagli ingegneri Brighi e Nasolini (Fig. 3.5.7) che prevedeva, per effettuare la regolazione di dover sganciare ogni volta il sistema, con la conseguente difficoltà di riaggancio, soprattutto se il precarico richiesto alla molla risultava elevato.



*Fig. 3.5.6: Particolare del sistema utilizzato per regolare il precarico delle molle*



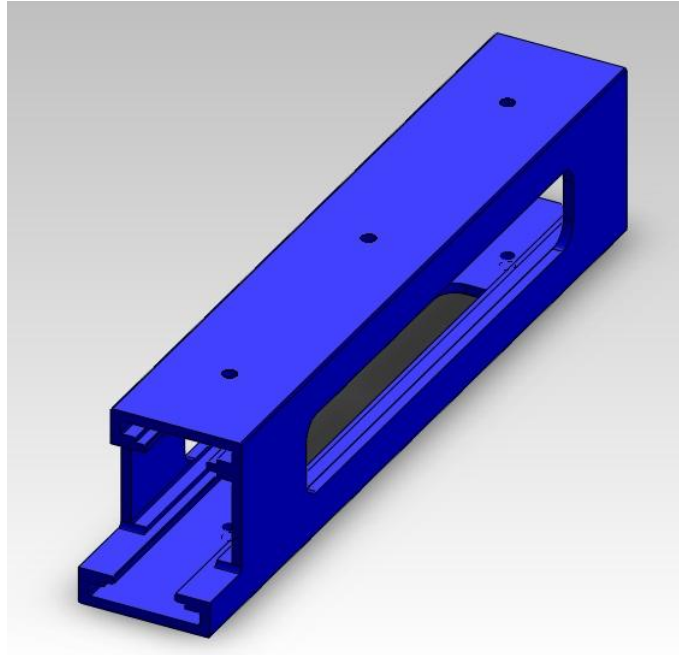


*Fig. 3.5.7: Particolare del sistema di regolazione del precarico elastico degli ingegneri Brighi e Nasolini*

### **3.5.2 LE GUIDE FISSE**

Le guide fisse sono quegli elementi che consentono alle guide mobili di traslare, sono ubicate all'interno dei bracci di sostegno del rotore e sono fissate ad esso mediante viti.

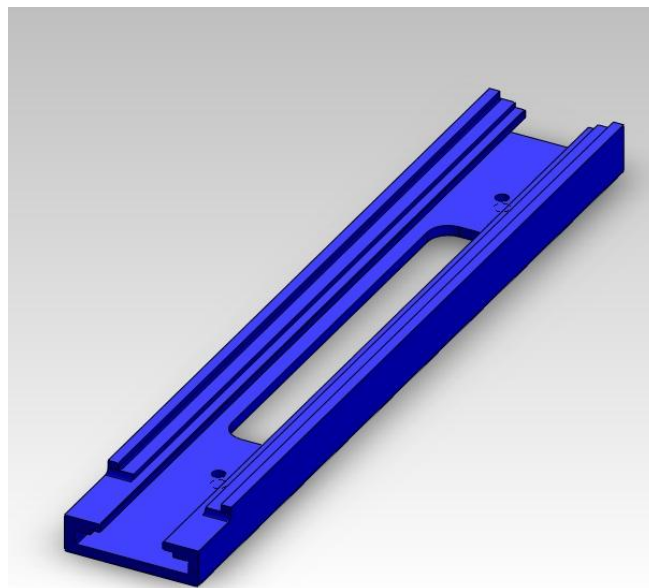
Ogni guida fissa (al di fuori di quella in corrispondenza dell'ultima pala in alto Fig. 3.5.9) è stata progettata per consentire al suo interno l'accoppiamento con due guide mobili, questo sempre in un ottica di riduzione degli ingombri.



*Fig. 3.5.8: La guida fissa completa*

Ogni guida completa è lunga 780mm, larga 130mm e alta 166mm.

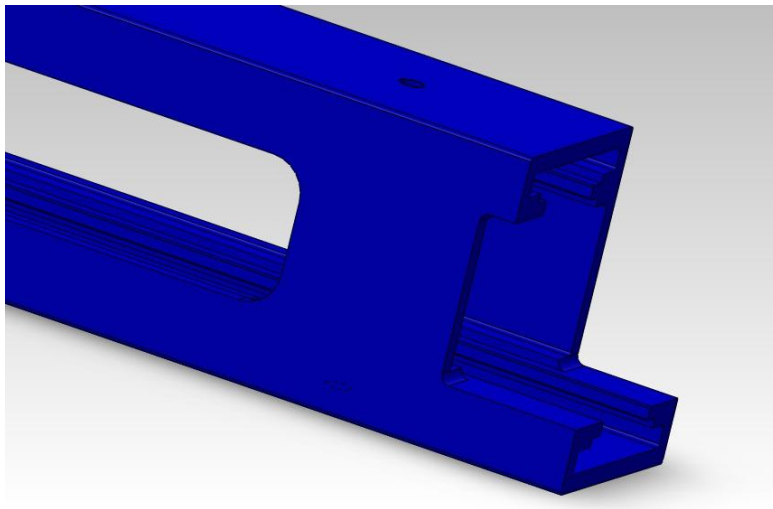
Per ridurre la massa sono state effettuate diverse cavità, nei fianchi e sulla sommità in più, nella parte anteriore in prossimità delle biellette, è stata effettuata una particolare cava mediante fresatura laterale (Fig. 3.5.10) per accompagnare le guide mobili fino all'ultimo nella corsa, facendo sì però che durante il movimento le biellette non arrivino a contatto con la guida.



*Fig. 3.5.9 :La guida fissa dell'ultima pala superiore*

### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

Non è stato realizzato nessuno scalino o componente per effettuare la funzione di blocco della corsa delle guide mobili in corrispondenza delle condizioni estreme di funzionamento, infatti, all'avviamento si vogliono le pale alla massima apertura (circa  $50^\circ$ ), e tale posizione (e quindi anche la posizione delle guide mobili rispetto a quelle fisse) è definita dal precarico fornito alle molle del sistema di avviamento, invece a regime la faccia interna delle pale sarà a contatto e di conseguenza anche la corsa delle guide mobili sarà automaticamente bloccata senza richiedere l'ausilio di particolari sistemi. Anche in questo caso per le guide si è deciso di adottare come materiale l'alluminio 3.0205 (EN AW-1200).



*Fig. 3.5.10: Particolare dell'anteriore della guida fissa*

### 3.6 PERNI DEI PROFILI ALARI

Per il dimensionamento di massima dei perni in acciaio applicati agli estremi delle pale, si è partiti dapprima con la determinazione dei carichi agenti su di essi (Fig. 3.6.1).

Il perno più sollecitato sarà ovviamente quello che si trova nell'ultima pala portante infondo perché deve sopportare la massa dell'intero rotore (che grazie alla funzione "proprietà di massa" del software "SolidWorks 2011" è stata ricavata ed è pari a : 5100 Kg a cui corrisponde una forza peso pari a circa 50000N).

Non trascurabile poi risulta la forza centrifuga data dal relativo profilo palare, se infatti si considerano i seguenti dati:

- massa della mezza pala portante:  $M_p = 55$  kg;
- velocità tangenziale delle pale a regime:  $v = 48$  m/s;
- raggio del rotore :  $r = 5$  m;

Si ottiene la seguente forza centrifuga:

$$F_c = M_c * \frac{v^2}{r} = 55 * \frac{48^2}{5} = 25344 \text{ N}$$

Essendo due i perni per ogni pala va considerato solo metà di questo contributo.

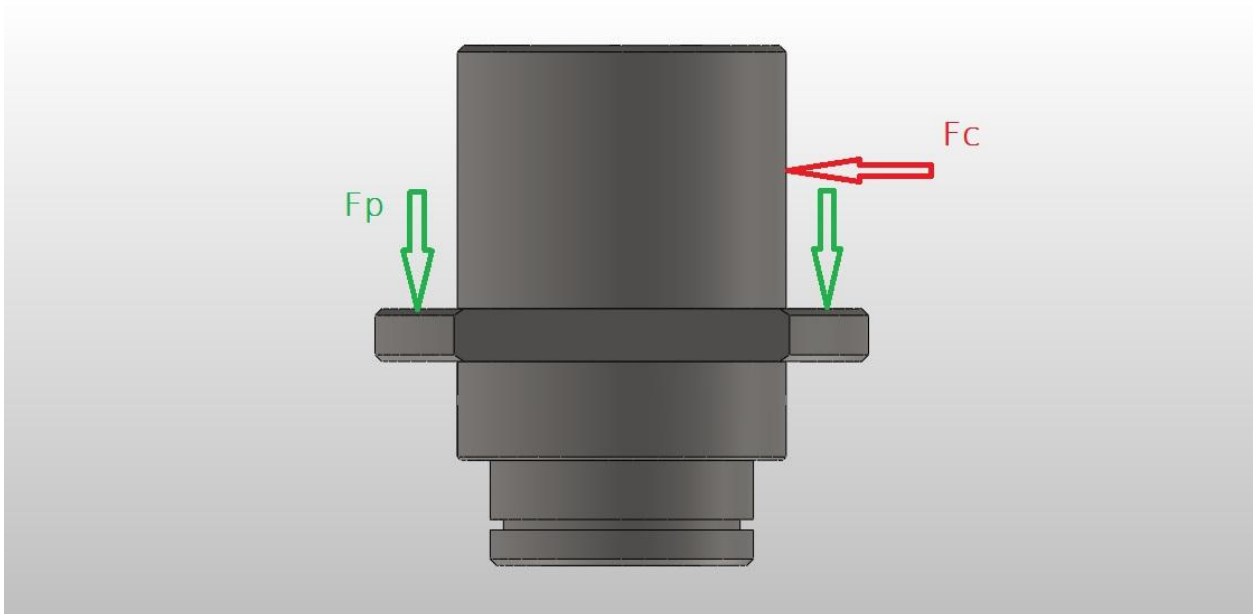


Fig. 3.6.1: Carichi applicati all'ultimo perno in basso

### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

I dati di partenza sono quindi:

- parte della forza peso prodotta dal rotore agente sul singolo perno:  $\frac{F_P}{3} = 17000 \text{ N}$ ;
- parte della forza centrifuga agente sul perno:  $\frac{F_C}{2} = 12672 \text{ N}$  ;
- distanza tra dove si considera applicata la forza centrifuga e la sede del cuscinetto:  
 $L = 43 \text{ mm}$ .

Si è determinato quindi il diametro minimo di primo tentativo considerando come materiale l' acciaio inossidabile DIN 1.4306 (X2CrNi19-11) con le seguenti caratteristiche (Fig. 3.6.2) e facendo un semplice calcolo a flessione:

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	1.9e+011	N/m <sup>2</sup>
Rapporto di Poisson	0.28	N/A
Modulo di taglio	7.9e+010	N/m <sup>2</sup>
Densità di massa	7800	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	600000000	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione in X		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	465000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di espansione termica	1.1e-005	/K
Conducibilità termica	14	W/(m-K)
Calore specifico	440	J/(kg-K)
Rapporto di smorzamento del materiale		N/A

Fig. 3.6.2: Caratteristiche dell'acciaio usato per i perni

Il momento flettente massimo a cui deve resistere il perno, nella condizione di vento più critica sarà:

$$M_f = \frac{F_C}{2} * L = 12672 * 43 = 544896 \text{ Nmm}$$

si ottiene la tensione prodotta dal momento flettente che, verrà considerata pari a quella ammissibile nel dimensionamento:

$$\sigma_{Mf} = \sigma_{amm} = \frac{M_f}{W_f} = \frac{M_f}{\frac{\pi d^3}{32}}$$

Supponendo il coefficiente di sicurezza CS pari a 4 si ottiene la tensione ammissibile che si vuole sul perno:

$$\sigma_{amm} = \frac{\sigma_{Rm}}{CS} = \frac{465}{4} = 116,3 \text{ MPa}$$

Da cui si può ricavare il diametro del perno  $d$ :

$$d = \sqrt[3]{\frac{32M_f}{\pi\sigma_{amm}}} = \sqrt[3]{\frac{32 * 544896}{\pi * 116,3}} = 36,3 \text{ mm}$$

Nella sezione più sollecitata, che sarà quella in corrispondenza del cuscinetto, vi sarà anche uno sforzo di taglio dato dalla forza centrifuga stessa, a vantaggio di sicurezza quindi si assume un diametro per il perno pari a 40mm e si fa la verifica tramite il criterio di Von Mises considerando anche il contributo del taglio:

$$\begin{aligned} \sigma_{eq} &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{M_f}{\frac{\pi d^3}{32}}\right)^2 + 3\left(\frac{4}{3} \frac{F_c}{2 \frac{\pi d^2}{4}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{544896}{\frac{\pi 40^3}{32}}\right)^2 + 3\left(\frac{4}{3} \frac{25344}{2 \frac{\pi 40^2}{4}}\right)^2} \\ &= \sqrt{7521 + 3 * 180.7} = 90 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Da cui si può ricavare il coefficiente di sicurezza effettivo che sarà:

$$CS = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} = \frac{465}{90} = 5,2$$

Che quindi sarà largamente accettabile.

Si è determinato così il diametro più piccolo del perno a cui verrà accoppiato il cuscinetto, ma come si può notare sempre dalla figura 3.6.1, per permettere la battuta con l'anima della pala e per permettere il bloccaggio assiale del cuscinetto sono stati

realizzati degli spallamenti in aggiunta (quindi si ha del materiale in più che partecipa alla suddivisione del carico).

Per quel che riguarda il carico normale, esso agisce nel lato cuscinetto su una battuta la cui area (corona circolare) è stata ricavata dalla funzione “valutare” del software cad 3D (Fig. 3.6.3).

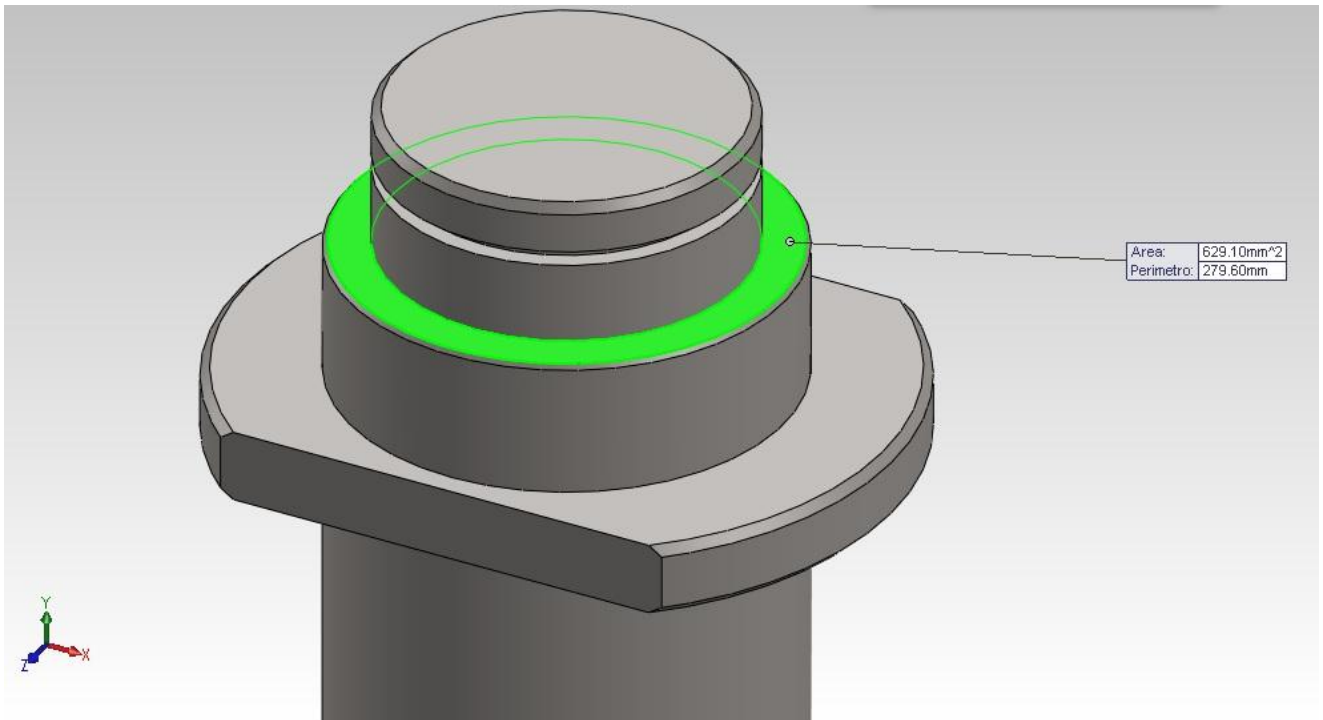


Fig. 3.6.3: L'area su cui si scarica il carico normale al perno

Tale area è pari circa  $629 \text{ mm}^2$  da cui si ricava una tensione normale:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} = \frac{17000}{629} = 27,3 \text{ MPa}$$

Che è sicuramente inferiore rispetto alla tensione di snervamento del materiale adottato.

### 3.7 L'ANIMA DELLA PALA PORTANTE

Come più volte accennato le pale più esterne nel rotore sono quelle portanti, perciò sono state dotate di un'anima interna tubolare per sorreggere il carico (Fig. 3.7.1).

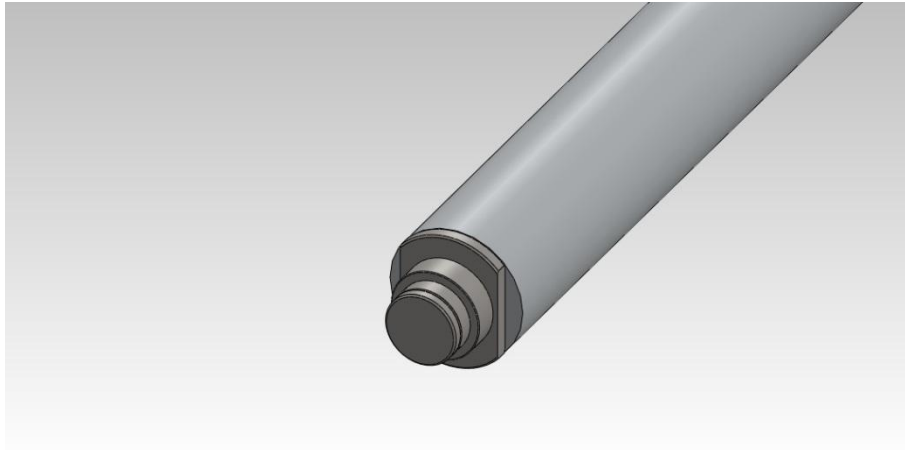


Fig. 3.7.1: L'anima interna delle pale accoppiata con i perni

Sono state realizzate sempre in alluminio, per cercare di contenere il più possibile i pesi, ma si è adottato una tipologia migliore, il 7075-T6 (SN) caratterizzato da un carico di snervamento superiore (Fig. 3.7.2) pari a 505 MPa:

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	7.2e+010	N/m <sup>2</sup>
Rapporto di Poisson	0.33	N/A
Modulo di taglio	2.69e+010	N/m <sup>2</sup>
Densità	2810	kg/m <sup>3</sup>
Resistenza alla trazione	570000000	N/m <sup>2</sup>
Resistenza a compressione in X		N/m <sup>2</sup>
Snervamento	505000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente di espansione termica	2.36e-005	/K
Conducibilità termica	130	W/(m·K)
Calore specifico	960	J/(kg·K)
Rapporto di smorzamento del materiale		N/A

Fig. 3.7.2: Caratteristiche meccaniche dell'alluminio

Sono state adottate le seguenti dimensioni (Fig. 3.7.3) in funzione di quelle trovate per i perni:



### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

- diametro esterno: 75 mm;
- diametro interno: 40 mm;
- lunghezza complessiva: 2510mm.

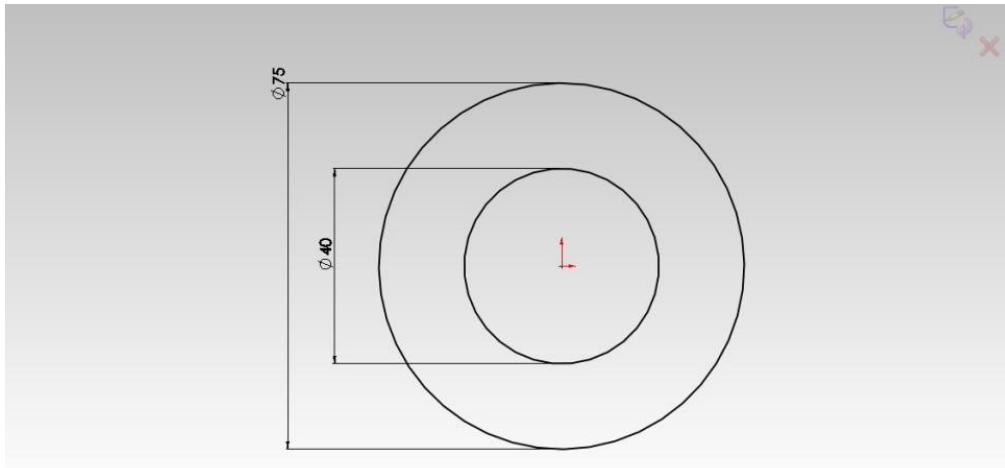


Fig. 3.7.3: Dimensioni della sezione dell'anima interna

Per effettuare la verifica della bontà delle dimensioni imposte, si è ipotizzato (Fig. 3.7.4) di considerare, per velocizzare i calcoli solo metà anima, su cui quindi agirà metà forza centrifuga.

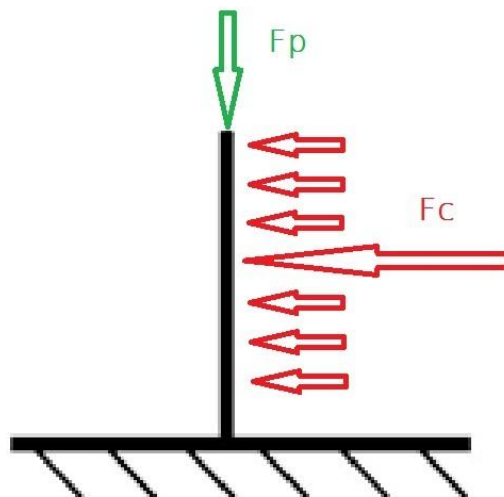


Fig. 3.7.4: Schematizzazione dei carichi agenti sulla metà dell'anima della pala

La forza centrifuga poiché agisce su tutta la superficie dell'anima viene considerata come uniformemente distribuita, quindi il suo braccio, considerato per la determinazione del momento flettente, sarà pari ad un mezzo della lunghezza totale dell'anima. Anche la forza peso risulta essere diversa rispetto al caso dei perni, infatti non si è tenuto conto

del peso di un piano di bracci, poiché rimanendo sotto non gravano sull'ultima pala, ora è  $F_p = 40000$  N.

I dati di partenza ora saranno quindi:

- la forza peso prodotta dal rotore agente sul singolo perno:  $\frac{F_p}{3} = 13335$  N;
- parte della forza centrifuga agente sull'anima:  $F_c = 25344$  N ;
- distanza tra dove si considera applicata la forza centrifuga e la fine dell'anima tubolare:  $l = \frac{L}{2} = \frac{2510}{2} = 1255$  mm.

Nell'ultima sezione in basso quindi vi sarà un insieme di più sollecitazioni semplici, per ciò occorrerà verificare il loro effetto globale scomponendole con il metodo della sovrapposizione degli effetti, combinando cioè le tensioni prodotte dalle singole sollecitazioni semplici.

Si avrà sforzo normale dovuto alla forza peso:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} = \frac{F_n}{\frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)} = \frac{13335}{\frac{\pi}{4}(75^2 - 40^2)} = 4,22 \text{ MPa}$$

La tensione massima prodotta dal momento flettente:

$$\sigma_{Mf} = \frac{M_f}{W_f} = \frac{F_c * l}{\frac{\pi}{32} * \frac{D^4 - d^4}{D}} = \frac{\frac{25344}{2} * 1255}{\frac{\pi}{32} * \frac{75^4 - 40^4}{75}} = 417 \text{ MPa}$$

Lo sforzo di taglio dovuto alla forza centrifuga:

$$\tau = \frac{4 F_c}{3} \frac{1}{A} \frac{1}{2} = \frac{4}{3} \frac{25344}{3161} \frac{1}{2} = 5,3 \text{ MPa}$$

Le tensioni totali nel punto più sollecitato della sezione (ovvero nel punto in cui le tensioni da sforzo normale e da momento flettente sono concordi) sono:

$$\sigma_x = -\sigma_{Mf} - \sigma_n = -417 - 4,22 = -421,22 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = \tau = 5,3 \text{ MPa}$$

Le tensioni ideali in tale punto saranno:

$$\begin{aligned}\sigma_{id1} &= 0,35 \sigma_x \mp 0,65 \sqrt{(\sigma_x)^2 + 4(\tau_{xy})^2} \\ &= 0,35 * -421,22 \mp 0,65 \sqrt{(-421,22)^2 + 4(5,3)^2} \\ &= \begin{cases} \sigma_{id1} = -421 \text{ Mpa} \\ \sigma_{id2} = 126 \text{ Mpa} \end{cases}\end{aligned}$$

Da cui si ricava un coefficiente di sicurezza:

$$CS = \frac{S_y}{\sigma_{id1}} = \frac{505}{421} = 1,2$$

A questo punto, si è provveduto anche ad effettuare anche la verifica a carico di punta.

Si considera ora la lunghezza completa dell'anima, ossia  $L = 2510 \text{ mm}$ .

Calcolo del raggio d'inerzia:

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{64} (D^4 - d^4)}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}} = \sqrt{\frac{\frac{\pi}{64} (75^4 - 40^4)}{\frac{\pi}{4} (75^2 - 40^2)}} = 21,25 \text{ mm}$$

La lunghezza equivalente  $L_e$ , che occorre assumere per terminare la procedura, dipende dal sistema dei vincoli che si trovano nel tratto compresso (Fig. 3.7.5). Si ricava che per il caso in esame dovrà essere :

$$L_e = 0,8 L = 0,8 * 2510 = 2008 \text{ mm}$$

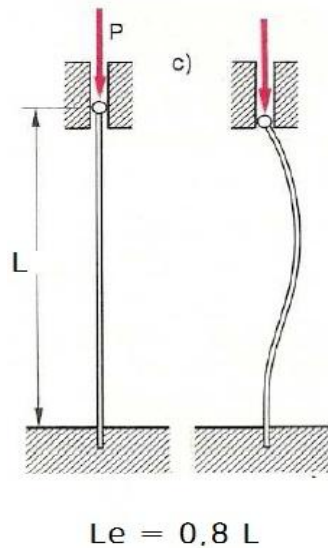


Fig. 3.7.5: Schematizzazione di una trave soggetta al carico di punta analogo al caso in oggetto

Da cui ne consegue che il rapporto di snellezza  $\lambda$  sarà:

$$\lambda = \frac{L_e}{\rho} = \frac{2008}{21,25} = 94,5$$

Si determina ora il carico critico di Eulero per il carico di punta:

$$S_{Cr-Eulero} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 72000}{94,5^2} = 79,6 \text{ MPa}$$

La tensione dovuta alla forza peso si è visto che vale :

$$\sigma_n = \frac{F_n}{A} = 4,22 \text{ MPa}$$

e dunque il coefficiente di sicurezza risulta:

$$CS = \frac{S_{Cr-Eulero}}{\sigma_n} = \frac{79,6}{4,22} = 18,9$$

Il valore ottenuto è sicuramente alto, però occorre considerare che non si è tenuto conto, in tale verifica, della forza centrifuga, quindi per un risultato più coerente con la realtà, si rimanda al capitolo 6 in cui, effettuando la verifica mediante elementi finiti si è riuscito a tener conto anche di questo contributo.

### 3.8 SCELTA DEI CUSCINETTI

Definite le dimensioni dei perni delle pale e delle rispettive anime interne, è stato immediato ricavare i cuscinetti da utilizzare che ovviamente devono avere un diametro interno compatibile con quelli appena calcolati, ovvero di 40 mm.

I principali fattori che in genere influenzano la scelta del cuscinetto sono:

- la velocità massima: la limitazione è più sulla velocità periferica che non su quella di rotazione;
- la capacità di carico statico: essa non deve essere superata, soprattutto nel caso in cui il cuscinetto sia soggetto ad un carico elevato quando non ruota, altrimenti sfere o rulli impronteranno le piste (fenomeno del brinelling);
- la lubrificazione : è particolarmente importante per applicazioni a velocità elevate e quindi non è fondamentale nel caso in oggetto;
- requisito di durata : la relazione di Palmgren stabilisce che la durata del cuscinetto varia inversamente all'esponente  $p$ , che varia da 3 per cuscinetti a sfere, a 10/3 per cuscinetti a rulli.

La relazione è:

$$L = L_R \left( \frac{C}{F_R} \right)^p$$

dove:

- C: coefficiente di carico;
  - $L_R$ : durata corrispondente al coefficiente di carico ( $9 \cdot 10^7$  cicli);
  - $F_R$ : carico radiale relativo all'applicazione
  - L: durata corrispondente al carico radiale  $F_R$ .
- 
- requisito di affidabilità : la durata standard, detta "vita a  $L_{10}$ " corrisponde al 10% di cedimenti, cioè la durata per cui il 90% dei pezzi non ha ceduto. Molti progetti richiedono un'affidabilità superiore al 90%. La durata a fatica corrisponde alla distribuzione di Weibull. Utilizzando numerosi dati

sperimentali l'AFBMA ha formulato i fattori di affidabilità correttivi della durata  $K_r$  (Fig. 3.8.1). La formula della durata diventa quindi:

$$L = K_r L_R \left( \frac{C}{F_R} \right)^p$$

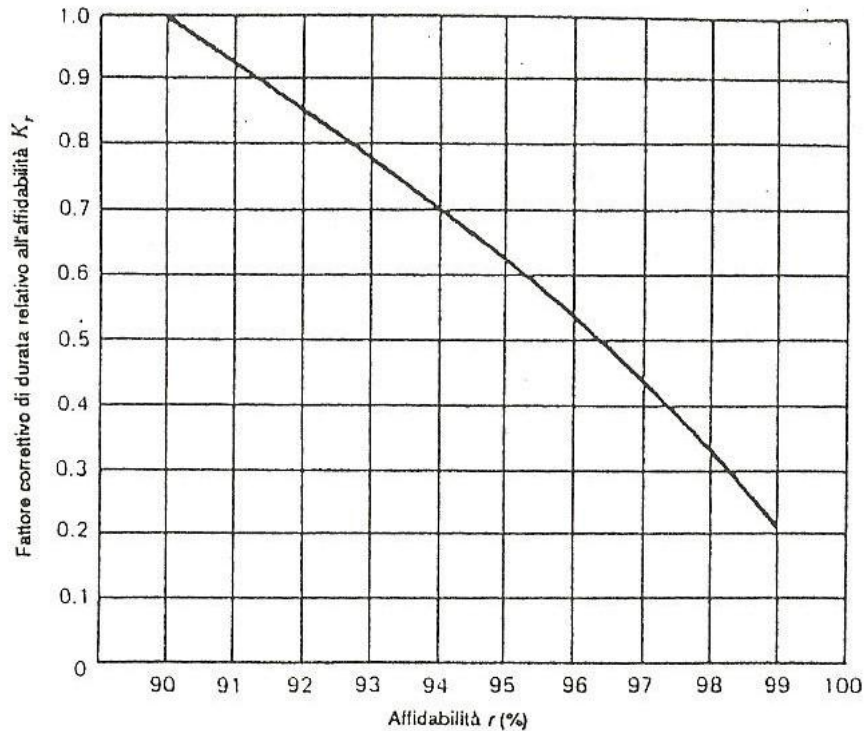


Fig. 3.8.1: Fattore di affidabilità  $K_r$  correttivi della durata

- influenza del carico assiale: i cuscinetti a rulli cilindrici sono molto limitati nella loro capacità di carico assiale perché i carichi assiali producono attrito di strisciamento fra rulli ed orletti. Al massimo possono sopportare il 20% delle loro capacità di carico stimate. I cuscinetti a rulli conici possono invece sopportare notevoli carichi assiali. Per cuscinetti a sfere qualsiasi combinazione di carico radiale e assiale dà luogo approssimativamente alla stessa durata di un carico equivalente radiale puro  $F_e$ , calcolato con le equazioni che seguono:

Per cuscinetti radiali a sfere ( $\alpha = 0^\circ$ )

$$\text{se } 0 \leq \frac{F_T}{F_R} \leq 0.35 \rightarrow F_e = F_R$$

$$\text{se } 0.35 \leq \frac{F_T}{F_R} \leq 10 \rightarrow F_e = F_R \left[ 1 + 1.115 \left( \frac{F_T}{F_R} - 0.35 \right) \right]$$

$$\text{se } \frac{F_T}{F_R} \geq 10 \rightarrow F_e = 1.176 F_R$$

Per cuscinetti obliqui a sfere ( $\alpha = 25^\circ$ )

$$\text{se } 0 \leq \frac{F_T}{F_R} \leq 0.68 \rightarrow F_e = F_R$$

$$\text{se } 0.68 \leq \frac{F_T}{F_R} \leq 10 \rightarrow F_e = F_R \left[ 1 + 0.870 \left( \frac{F_T}{F_R} - 0.68 \right) \right]$$

$$\text{se } \frac{F_T}{F_R} \geq 10 \rightarrow F_e = 0.911 F_T$$

- carico da urti: la capacità di carico tabulata di un cuscinetto è per la condizione di carico uniforme in assenza di urti. Questa condizione, in generale sempre auspicabile, si riscontra solo in determinate applicazioni, per esempio sugli alberi di un motore elettrico, ma in altri casi ci sono diversi gradi di carico da urti. Questo richiede di aumentare il carico nominale di un fattore  $K_a$ , detto fattore correttivo relativo al tipo di carico  $K_a$ . i valori tipici sono i seguenti:

TIPO DI APPLICAZIONE	CUSCINETTO A SFERE	CUSCINETTO A RULLI
CARICO UNIFORME, SENZA URTI	1.0	1.0
INGRANAGGI	1.0-1.3	1.0
URTI LIEVI	1.2-1.5	1.0-1.1
URTI MODERATI	1.5-2.0	1.1-1.5
URTI PESANTI	2.0-3.0	1.5-2.0

Sostituendo  $F_e$  a  $F_R$  e considerando il coefficiente  $K_a$  l'equazione finale generica risulta essere:

$$L = K_r L_R \left( \frac{C}{K_a F_e} \right)^p$$

La durata di progetto  $L$  in migliaia di ore dipende dal tipo di macchina in esame. Supponendo che la turbina eolica debba lavorare in servizio continuo (24 su 24) ci si attesta intorno ai valori di 40/50 migliaia di ore.

Per questo progetto sono stati scelti cuscinetti radiali a sfere obliqui ( $\alpha=25^\circ$ ), serie media (tipo 206), in quanto presente carico assiale abbastanza elevato, rispetto a quello radiale.

Coefficienti di carico dei cuscinetti C per una vita di $90 \cdot 10^6$ giri con un'affidabilità del 90%									
DI [mm]	Radiali a sfere, $\alpha=0^\circ$			Obliqui a sfere, $\alpha=25^\circ$			A rulli		
	L00 extra leggero [kN]	200 leggero [kN]	300 medio [kN]	L00 extra leggero [kN]	200 leggero [kN]	300 medio [kN]	1000 extra leggero [kN]	1200 leggero [kN]	1300 medio [kN]
10	1,02	1,42	1,90	1,02	1,10	1,88			
12	1,12	1,42	2,46	1,10	1,54	2,05			
15	1,22	1,56	3,05	1,28	1,66	2,85			
17	1,32	2,70	3,75	1,36	2,20	3,55	2,12	3,80	4,90
20	2,25	3,35	5,30	2,20	3,05	5,80	3,30	4,40	6,20
25	2,45	3,65	5,90	2,65	3,25	7,20	3,70	5,50	8,50
30	3,35	5,40	8,80	3,60	6,00	8,80	2,40 <sup>a</sup>	8,30	10,0
35	4,20	8,50	10,6	4,75	8,20	11,0	3,10 <sup>a</sup>	9,30	13,1
40	4,50	9,10	12,6	4,95	9,90	13,2	7,20	11,1	16,5
45	5,80	9,40	14,8	6,30	10,4	16,4	7,40	12,2	20,9
50	6,10	9,70	15,8	6,60	11,0	19,2	5,10 <sup>a</sup>	12,5	24,5

Fig. 3.8.2: Tabella dei coefficienti di carico per cuscinetti a rotolamento

Il rapporto fra il carico assiale e quello radiale è  $\frac{F_T}{F_R} = \frac{17000}{12672} = 1,34$  da cui, in base alle relazioni elencate sopra, si ottiene:

$$F_e = F_R \left[ 1 + 0,870 \left( \frac{F_T}{F_R} - 0,68 \right) \right] = 12672 \left[ 1 + 0,870 \left( \frac{17000}{12672} - 0,68 \right) \right] = 19965 \text{ N}$$

Il coefficiente di carico C si ricava dalla tabella soprastante (Fig. 3.8.2) e vale 13200 N. Supponendo di volere un'affidabilità del 90% il coefficiente  $K_r$  vale 1 (Fig. 3.8.1), e considerando il carico uniforme senza urti anche il coefficiente  $K_a$  vale 1. E' possibile stimare la durata L:

$$L = K_r L_R \left( \frac{C}{K_a F_e} \right)^p = 1 * 9 * 10^7 * \left( \frac{13200}{1 * 19965} \right)^3 = 26010959 \text{ cicli}$$

che in ore valgono, considerando per il cuscinetto un regime di rotazione di 10 rpm a cui corrispondono altrettanti cicli di apertura / chiusura delle pale :

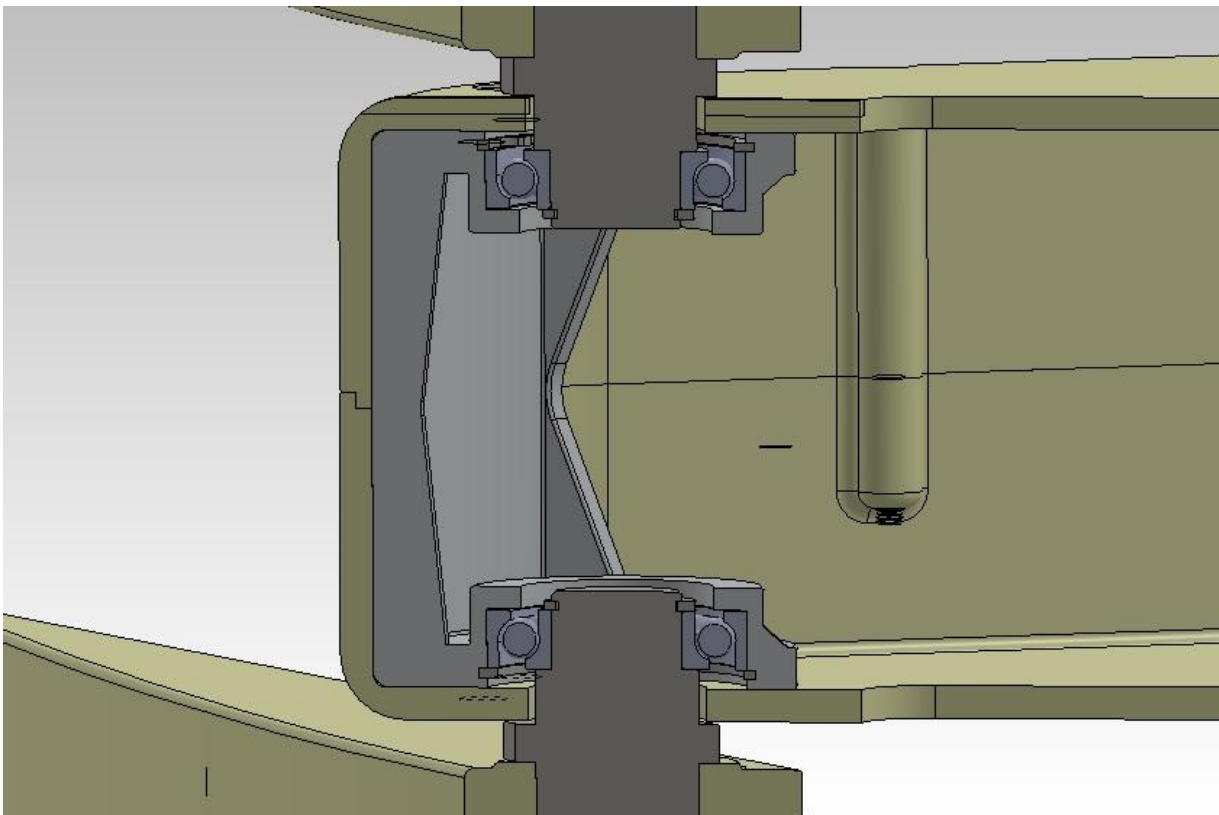


$$L_h = \frac{L}{60 n} = \frac{26010959}{60 * 10} = 43355 \text{ ore}$$

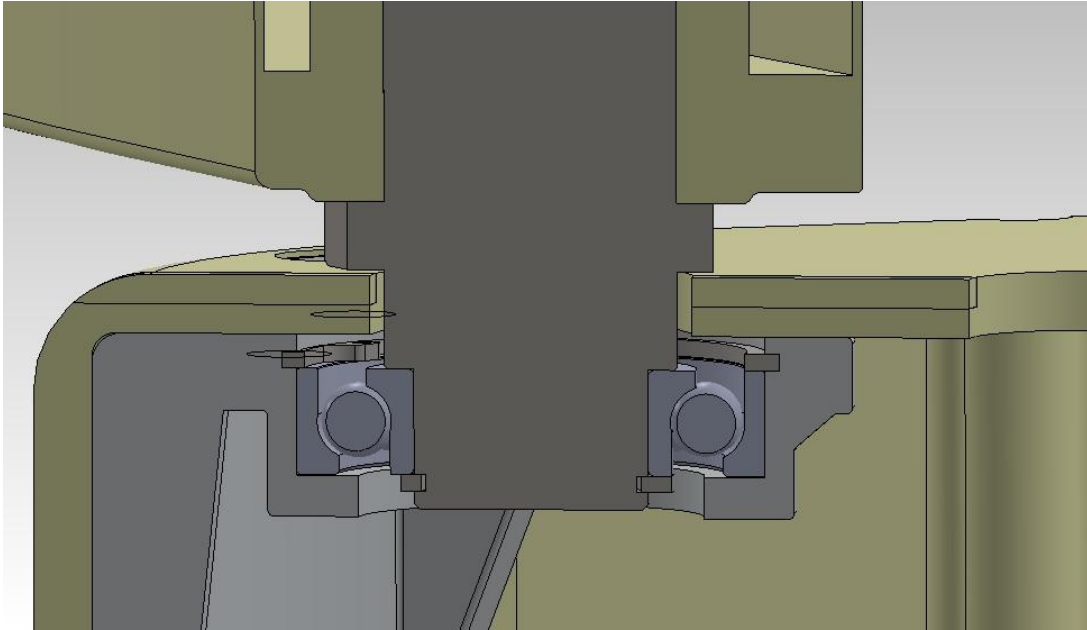
che è un valore compatibile con il funzionamento continuo che si suppone per la turbina Darrieus.

La turbina è complessivamente dotata di 24 cuscinetti di questo tipo, due per ogni mezzo profilo.

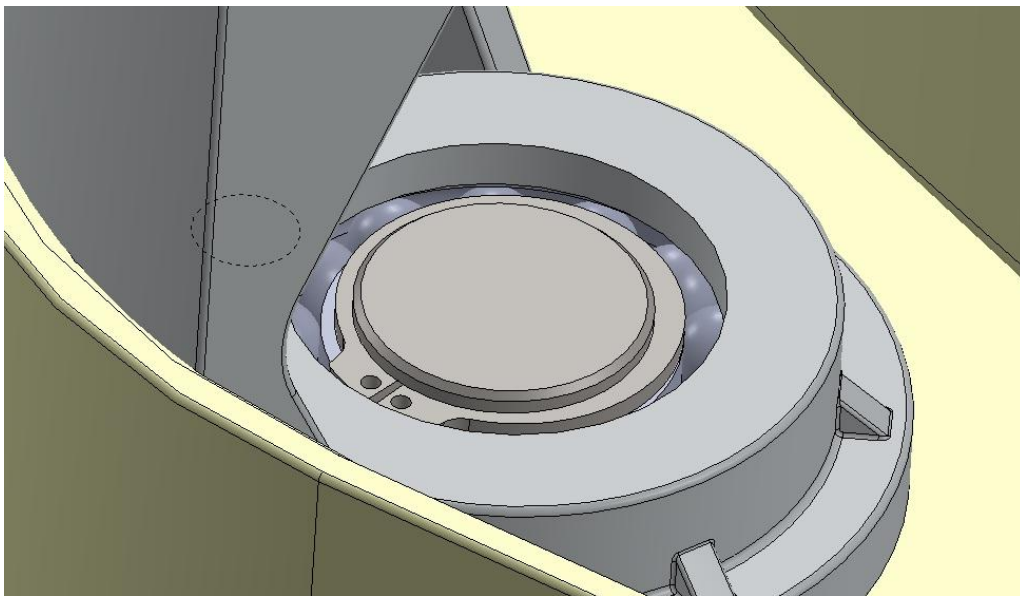
Sono riportate sotto in figura 3.8.3, 3.8.4, 3.8.5, 3.8.6 i disegni schematizzati con il CAD 3D dei cuscinetti e del loro montaggio nel sistema di avviamento all'interno di ogni singolo braccio del rotore.



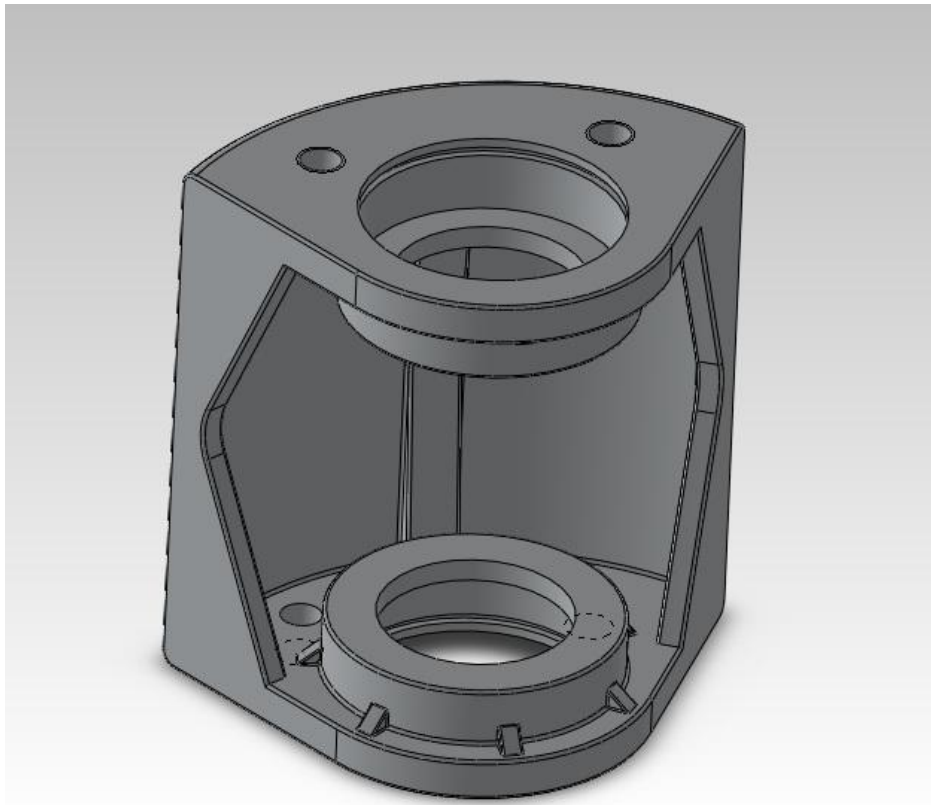
*Fig. 3.8.3: Montaggio di una coppia di cuscinetti all'interno di un braccio del rotore*



*3.8.4: Particolare di un cuscinetto*



*3.8.5: Sistema di bloccaggio dei cuscinetti mediante anelli elastici*



*Fig. 3.8.6: Supporto realizzato in alluminio per contenere i cuscinetti*

### **3.9 COLLEGAMENTI BULLONATI DEI CARRELLI**

Le unioni bullonate debbono garantire un buon funzionamento della struttura e l'aderenza della stessa allo schema statico.

Conviene utilizzare tale tipologia di unione perché sono:

- facili da progettare;
- rapide da realizzare in aderenza al progetto;
- economiche.

Si è cercato di ridurre il più possibile il ricorso a saldature, che andranno effettuate in officina, privilegiando le bullonature perché sono facilmente eseguibili in cantiere.

Nello specifico si è deciso di collegare ogni carrello alla struttura sovrastante mediante quattro bulloni (Fig. 3.9.1).

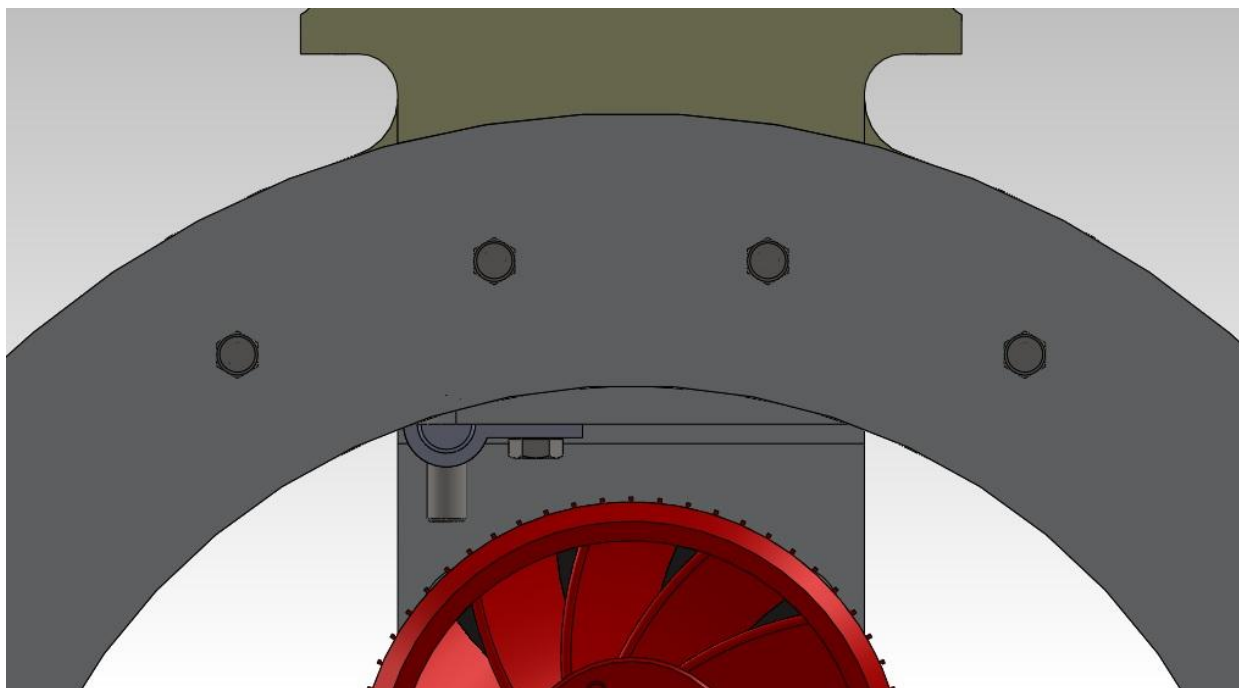


Fig. 3.9.1: Particolare dei bulloni utilizzati per il bloccaggio dei carrelli

La piastra circolare solidale ai carrelli è accoppiata al componente di sostegno secondo lo schema di figura 3.9.2:

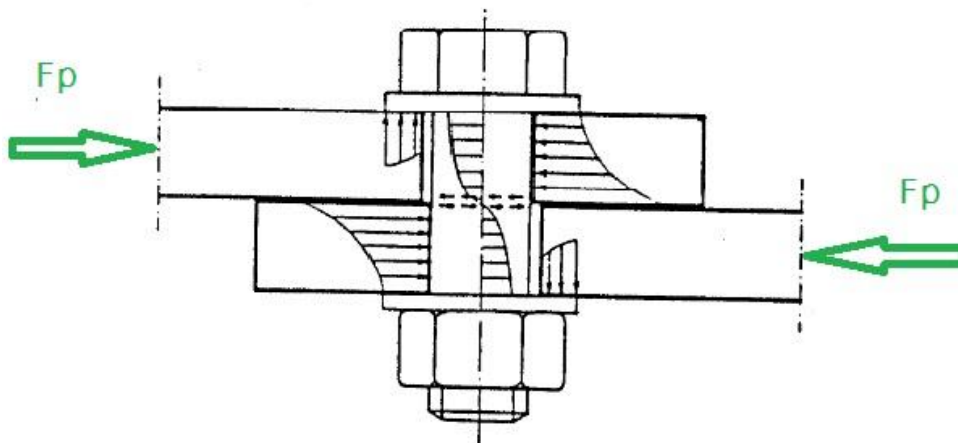


Fig. 3.9.2: Schema di ripartizione dei carichi sul singolo bullone

Su ogni bullone agirà una forza dovuta al peso della struttura sovrastante, ovvero quella del rotore più quella dei componenti di collegamento. Su ogni carrello verrà riversata un terzo di tale forza, che quindi ora sarà 17105 N.

Si passa quindi al dimensionamento dei bulloni, dati di partenza:

### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

- forza per ogni carrello:  $F_p = 17105 \text{ N}$ ;
- bullone per ogni carrello:  $n = 4$ ;
- coefficiente di attrito:  $\mu = 0,25$ ;
- numero di superfici di accoppiamento:  $z = 1$ ;

Si procede quindi con il calcolo della forza iniziale di serraggio, tenendo conto che i bulloni da dimensionare possiedono tutti la stessa area e che la trasmissione delle forze esterne avviene mediante attrito tra le parti con un coefficiente di sicurezza C.S. = 4

$$F_i = \frac{F_e}{n z \mu} = \frac{17105}{4 * 1 * 0,25} = 17105 \text{ N}$$

Non essendo presenti forze di trazione sui bulloni il dimensionamento lo si effettua in funzione del valore appena trovato attraverso la seguente formula che permette di calcolare l'area minima necessaria e quindi il tipo di filettatura metrica:

$$F_i \leq A_t S_p$$

Dove con  $S_p$  si intende la tensione di precarico a cui sarà sottoposto il bullone. Si decide di utilizzare un bullone di grado SAE 9.8 caratterizzato da una tensione di precarico  $S_p$  pari a 660 MPa (Fig.3.9.3).

Grado SAE	Diametro $d$ (mm)	Tensione di precarico <sup>a</sup> $S_p$ (MPa)	Tensione di snervamento <sup>b</sup> $S_y$ (MPa)	Tensione di rottura $S_u$ (MPa)	Allungam. minimo (%)	Riduzione d'area minimo (%)	Durezza gambo Rockwell	
							Min	Max
4.6	5 fino 36	225	240	400	22	35		
4.8	1,6 fino 16	310	-	420	-	-	B67	B87
5.8	5 fino 24	380	-	520	-	-	B71	B87
							B82	B95
8.8	1,7 fino 36	600	660	830	12	35	C23	C34
9.8	1,6 fino 16	650	-	900	-	-	C27	C36
10.9	6 fino 36	830	940	1040	9	35	C33	C39
12.9	1,6 fino 36	970	1100	1220	8	35	C38	C44

<sup>a</sup> La tensione limite di precarico corrisponde ad un allungamento permanente non superiore a 0,0025 mm misurato nei bulloni.

<sup>b</sup> Valore corrispondente ad una deformazione permanente dello 0,2% misurata sul materiale con macchine di prova.  
Fonte: Society of Automotive Engineers Norma J1199 (1979).

Fig. 3.9.3: Caratteristiche meccaniche del materiale dei bulloni

La sezione resistente minima per un bullone di tale grado risulta:

$$A_{t-\min} = \frac{F_i \text{ C.S.}}{S_p} = \frac{17105 * 4}{660} = 103,7 \text{ mm}^2$$

A favore di sicurezza verranno scelti bulloni tutti uguali, con area resistente superiore a quella appena calcolata (Fig. 3.9.4), e quindi del tipo M14x2 aventi  $A_t = 115 \text{ mm}^2$ .

Ora si può calcolare anche il valore della forza di serraggio  $F_s$ , che risulta fondamentale perchè :

- ostacola lo scorrimento delle piastre (ripresa dei giochi);
- ostacola il distacco delle piastre nelle unioni a trazione.

Ed induce:

- penetrazione del bullone equilibrata dalla precompressione delle piastre;
- torsione del bullone equilibrata dall'attrito.

In questo caso vale:

$$F_s = 0,9 A_t S_p = 0,9 * 115 650 = 67275 \text{ N}$$

E il momento di serraggio vale:

$$M_s = 0,2 F_s d = 0,2 * 67275 * 14 = 188370 \text{ Nmm}$$

Diametro nominale $d$ (mm)	Passo grosso		Passo fine	
	Passo $p$ (mm)	Sezione resistente $A_t$ (mm <sup>2</sup> )	Passo $p$ (mm)	Sezione resistente $A_t$ (mm <sup>2</sup> )
3	0,5	5,03		
3,5	0,6	6,78		
4	0,7	8,78		
5	0,8	14,2		
6	1	20,1		
7	1	28,9		
8	1,25	36,6	1	39,2
10	1,5	58,0	1,25	61,2
12	1,75	84,3	1,25	92,1
14	2	115	1,5	125
16	2	157	1,5	167
18	2,5	192	1,5	216
20	2,5	245	1,5	272
22	2,5	303	1,5	333
24	3	353	2	384
27	3	459	2	496
30	3,5	561	2	621
33	3,5	694	2	761
36	4	817	3	865
39	4	976	3	1030

Fig. 3.9.4: Caratteristiche geometriche dei bulloni

Per ovviare anche il caso cui si avesse una perdita di attrito tra le pareti si esegue anche la verifica a taglio. La tensione massima risulta pari a :

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} \frac{F_i \mu}{C.S. A_t} = \frac{4}{3} \frac{17105 * 0.25}{4 * 115} = 12.39 MPa$$

Ovviamente dovrà risultare inferiore alla tensione ammissibile a taglio del materiale, che è:

$$\tau_{amm} = \frac{S_y}{C.S. \sqrt{3}} = \frac{660}{4 * \sqrt{3}} = 95,3 MPa$$

Si sottolinea che comunque il dimensionamento a taglio dei bulloni risulta incerto, perché le sollecitazioni nella pratica non si possono considerare equiparate sui bulloni a causa della iperstaticità del collegamento, perciò si preferisce il dimensionamento per attrito. Occorrerà inoltre prevedere l'utilizzo di sistemi antisvitamento e controllare periodicamente la forza di serraggio mediante chiavi dinamometriche.

### **3.10 GENERATORE DI CORRENTE**

Il generatore di corrente è il cuore della turbina eolica, da esso dipende gran parte del lavoro di progettazione.

Un generatore elettrico è una macchina in cui la potenza in ingresso è di tipo meccanico e quella in uscita è di tipo elettrico.

In genere è composto da un rotore e uno statore che formano tra loro un campo magnetico da cui dipende il funzionamento di tutto il generatore.

Lo statore (Fig. 3.10.1) è la parte fissa del motore, ha il compito di sostenere la macchina, contiene parte degli avvolgimenti indotti o induttori installati in apposite cave. Generalmente ha le dimensioni maggiori e conferisce al motore la geometria che lo caratterizza.

Il rotore detto anche indotto, ha il compito di ruotare ed è grazie all'interazione tra i due elementi che si generano grandi forze attrattive e repulsive, che permettono al generatore di funzionare e produrre energia elettrica.

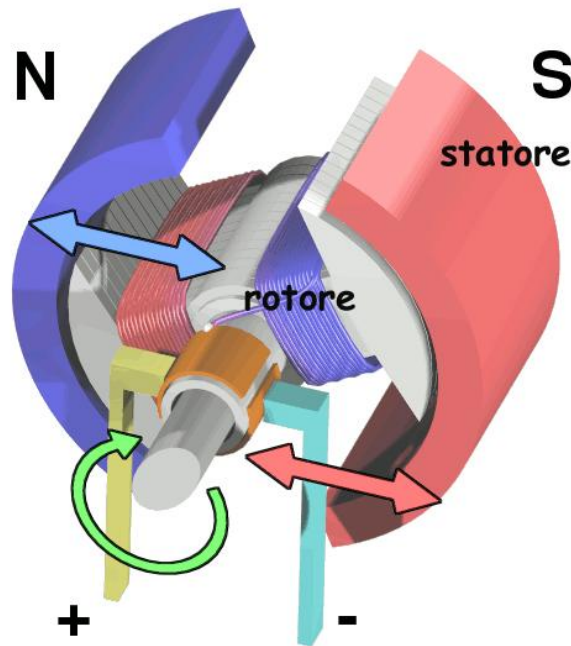


Fig. 3.10.1: Schematizzazione di un motore elettrico

In genere i motori elettrici si suddividono in due grandi famiglie:

- motori in corrente continua;
- motori a corrente alternata.

Si è deciso, nel caso in esame, di optare per motori a corrente continua, perché come noto, hanno un comportamento reversibile: diventano generatori di corrente continua se si collega un altro motore (per es. endotermico) all'albero. Si può allora prelevare l'energia elettrica prodotta collegandosi alle spazzole. Inoltre da questo si può intuire la sua capacità di agire anche da freno, talvolta usato anche per il recupero dell'energia nei mezzi ibridi; nel caso più semplice collegando alle spazzole un resistore, l'energia meccanica trasmessa all'albero si dissipa in calore su questo resistore. Riassumendo si può affermare che il motore a corrente continua ha tutte le funzioni necessarie per il progetto: può creare energia funzionando da dinamo, ma quando serve l'azione frenante può agire anche da freno, ed è per questo che è ottimo per il caso in oggetto.

Il motore in corrente continua si suddivide a sua volta in due grandi famiglie:

- **Motore in corrente continua a spazzole:** Il classico motore in corrente continua ha una parte che gira detta rotore o armatura, e una parte che genera un campo magnetico fisso detta statore. Un interruttore rotante detto commutatore o collettore a spazzole inverte due volte ad ogni giro la direzione della corrente elettrica che percorre i due avvolgimenti generando un campo magnetico che



entra ed esce dalle parti arrotondate dell'armatura. Nascono forze di attrazione e repulsione con i magneti permanenti fissi (indicati con N ed S nelle figure).

La velocità di rotazione dipende da:

- Tensione applicata;
- Corrente assorbita dal rotore;
- Carico applicato.

La coppia generata è proporzionale alla corrente ed il controllo più semplice agisce sulla tensione d'alimentazione.

Il suo limite principale è nella necessità del commutatore a spazzole, che cagionano certi alcuni inconvenienti, infatti:

- volenti o nolenti devono prima o poi essere sostituite;
- Le spazzole pongono un limite alla massima velocità di rotazione: maggiore è la velocità e più forte è la pressione che bisogna esercitare su di esse per mantenere un buon contatto;
- Tra spazzole e collettore, nei momenti di commutazione, si hanno transitori di apertura degli avvolgimenti induttivi e quindi scintillio;

Queste scintille comportano disturbi elettrici sia irradiati nell'ambiente circostante che trasmessi al generatore di tensione (che alimenta il motore); questi disturbi, in determinati settori di impiego, possono causare problemi di compatibilità elettromagnetica; è possibile attenuarli tramite dei filtri.

La presenza di avvolgimenti elettrici sul rotore ha anche due aspetti negativi:

- Se il motore è di grossa potenza si hanno dei problemi di smaltimento del calore (gli avvolgimenti si riscaldano per effetto Joule e il campo magnetico alternato nel nucleo del rotore genera altre perdite, causate da isteresi magnetica e correnti parassite nel nucleo stesso, e quindi altro calore).
- Gli avvolgimenti appesantiscono il rotore (aumenta il momento d'inerzia): se il motore deve rispondere con rapidità e precisione (come avviene nelle automazioni industriali e nella robotica) il controllo diventa più complesso

- motore brushless (Fig. 3.10.2) : è caratterizzato dal non aver bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero motore per funzionare. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti, infatti, non avviene più per via meccanica ma elettronicamente. Ciò comporta una minore resistenza meccanica, elimina la possibilità che si formino scintille al crescere della velocità di rotazione, e riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica.

In un motore brushless, l'inversione di corrente è ottenuta, tramite un banco di transistor di potenza comandati da un microcontrollore che controlla la

commutazione della corrente. Dato che il controllore deve conoscere la posizione del rotore rispetto allo statore, esso viene solitamente collegato a un sensore a effetto Hall, come il Pick-up o a un più preciso resolver.

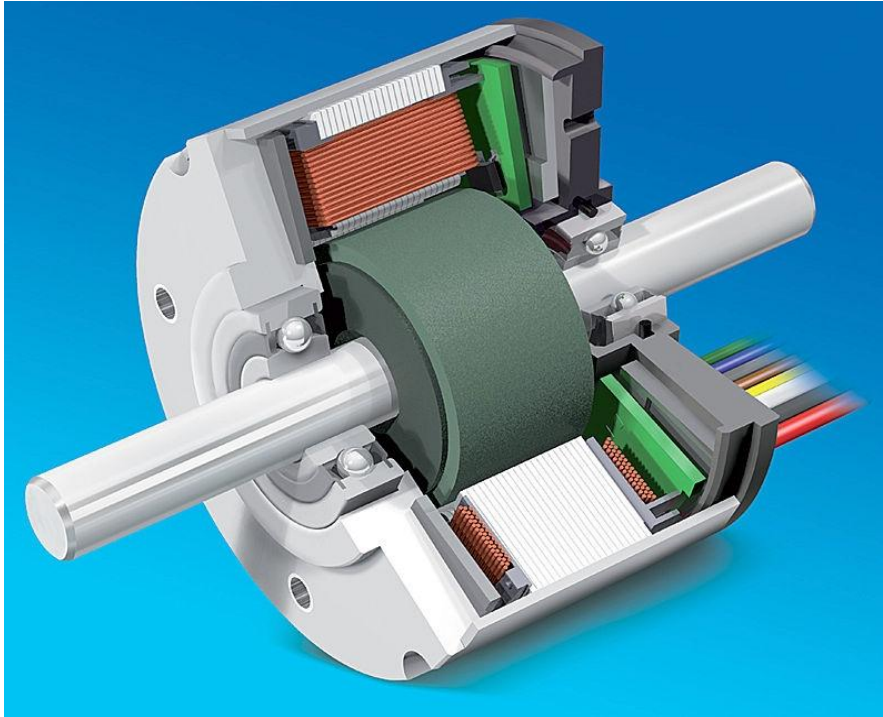
Vantaggi:

- Il primo grosso vantaggio riguarda la vita attesa del motore, dato che le spazzole sono il "punto debole" di un motore in corrente continua. L'assenza di spazzole elimina anche la principale fonte di rumore elettromagnetico presente negli altri motori in continua.
- L'ingombro è limitato rispetto alla potenza che possono erogare. In termini di efficienza, i motori brushless sviluppano molto meno calore di un equivalente motore in corrente alternata e, pertanto, si dice in gergo che "marciano freddi". Gli avvolgimenti sullo statore inoltre dissipano facilmente il calore generato e permettono di costruire motori "lisci", senza alettature esterne.
- L'assenza di scintille è fondamentale quando il motore opera in ambienti saturi di composti chimici volatili come i carburanti.
  
- In questo tipo di motori i magneti permanenti sono posizionati sul rotore e sono realizzati con speciali materiali che permettono di avere un'inerzia rotorica molto bassa, cosa che permette di avere un controllo estremamente preciso sia in velocità che in accelerazione.

Svantaggi :

- Il principale svantaggio di questo tipo di motori sta nel maggiore costo. Al contrario dei motori a spazzole, infatti, il controllo viene effettuato elettronicamente da un controller, un dispositivo elettronico fornito dal costruttore del motore o da terze parti, per questo non è solitamente possibile utilizzare un potenziometro o un reostato (inefficiente ma estremamente economico) per la regolazione della velocità.

Nel caso in oggetto i generatori saranno tre (uno per ogni carrello), e poiché dovranno ruotare insieme alla struttura dovranno essere caratterizzati da un basso rapporto peso/potenza. Risulta quindi più che chiaro, che quindi, il motore migliore per le esigenze suddette dovrà essere di tipo brushless .



*Fig. 3.10.2: Spaccato di un motore brushless*

Si è deciso di optare per un motore elettrico brushless per uso aeronautico, infatti, l'utilizzo di motori elettrici in aeronautica, è una tendenza in forte espansione, perciò risulta molto facile trovare sul mercato un motore leggero caratterizzato da un'elevata potenza specifica.

Dopo varie ricerche si è optato per un motore realizzato da una delle aziende leader del settore, la "Yunec".

La scelta è ricaduta verso il motore "Power Drive 40" (Fig. 3.10.3).

Il motore brushless Power Drive 40 di ultima generazione, è controllato internamente da sensori che garantiscono ogni tipo di controllo, garantendo quindi ottime prestazioni e grande affidabilità.

### CAPITOLO 3: PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI

Motor Designation	Power Drive 10 & 10+	Power Drive 20 & 20+	Power Drive 40	Power Drive 60
Power (Kw):	10Kw	20Kw	40Kw	60Kw
Power (Hp):	13HP	27HP	54HP	81HP
RPM:	2,400 (10) or 2,000 (10+)	2,400 (20) or 2,000 (20+)	2,400	2,400
<b>Type</b>	Direct Drive Brushless	Direct Drive Brushless	Direct Drive Brushless	Direct Drive Brushless
Control:	Internal Sensor	Internal Sensor	Internal Sensor	Internal Sensor
Diameter:	160mm (6.3")	200mm (7.9")	240mm (9.45")	280mm (11")
Length PD10:	114mm (4.5")	133mm (5.25")	163mm (6.5")	209mm (8.25")
PD10+:	127mm (5")	143mm (5.75")		
Weight PD10:	4.5Kg (10 lbs)	8.2Kg (18.04 lbs)	19Kg (42 lbs)	30Kg (66lbs)
PD10+:	6Kg (13.2 lbs)	9.8Kg (21.6 lbs)		
<b>Voltage</b>				
- Minimum:	50V	50V	100V	161V
- Maximum:	75V	75V	150V	190V
- Optimum:	66V	66V	133.2V	166.5V
<b>Current Drain</b>				
- Maximum:	180A	285A	285A	342A
- Cruise:	55A	180A	180A	220A
Bearing Qty:	3	2	2	2
Propeller Hub Diameter:	60mm (2.35")	75mm (2.95")	90mm	100mm (3.95")
Propeller Bolt size:	M6	M8	M8	M8
Propeller Bolt Qty:	4	6	6	6
Mounting Dimensions:	Ø 140mm (5.5")	Ø 170mm (9.85")	Ø 200mm	Ø 240mm (9.45")
Mounting Bolt size:	M8	M8	M8	M10
Mounting Bolt Qty:	4	6	6	6
Plug System:	E-Plug (OEM)	E-Plug (OEM)	E-Plug (OEM)	E-Plug (OEM)

Fig. 3.10.3: Cerchiate in rosso si possono vedere le caratteristiche del motore scelto

Queste caratteristiche lo rendono la fonte di alimentazione perfetta da utilizzare(Fig. 3.10.4).

Produce 40 KW a 2400 rpm, ha un peso veramente irrisorio di 19 kg e un diametro massimo dello statore di soli 200 mm (Fig.3.10.5).

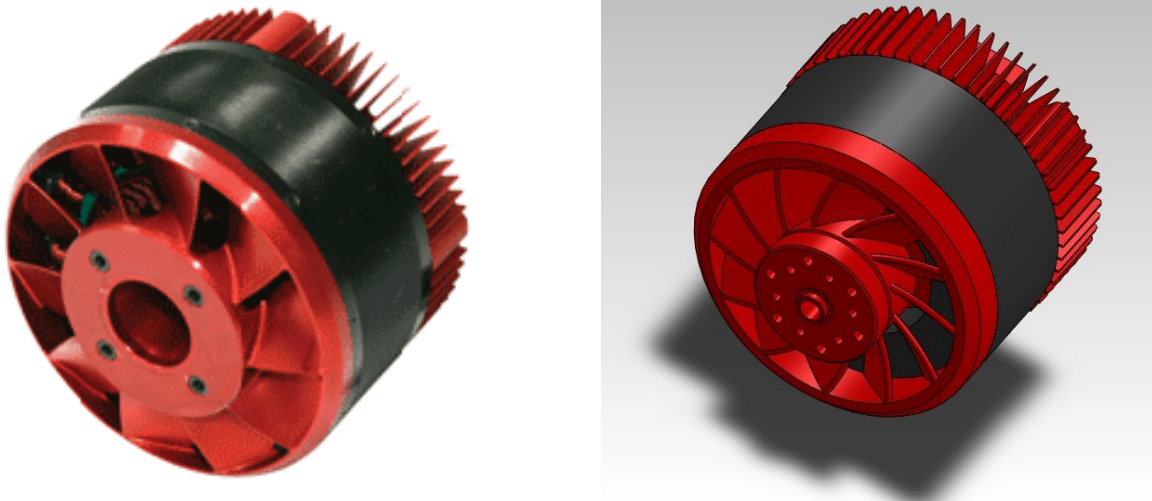


Fig.3.10.4: Il motore utilizzato, a sinistra si può notare una sua foto, mentre a destra la sua riproduzione CAD



Fig. 3.10.5: Foto che rende immediata la percezione degli ingombri del motore utilizzato

Le caratteristiche indicate fanno sì che non vi sia neanche bisogno di un riduttore tra la ruota del generatore e il generatore stesso, infatti, se si considera il raggio medio della rotaia che è 5550 mm, si avrà una circonferenza su cui deve ruotare la ruota pari a:

$$Circ_{Rotaia} = 2 \pi R_{Rotaia} = 2 * \pi * 5550 = 34872 \text{ mm}$$

Assumendo per la ruota solidale al rotore del generatore un raggio pari a 210 mm, se ne ricava la sua circonferenza:

$$Circ_{Ruota} = 2 \pi R_{Ruota} = 2 * \pi * 210 = 1320 \text{ mm}$$

Da cui si ricavano le rotazioni che compie la ruota per ogni giro completo dal rotore sulla rotaia:

$$Rotaz_{Ruota} = \frac{Circ_{Rotaia}}{Circ_{Ruota}} = \frac{34872}{1320} = 26,42 \text{ rotazioni}$$

Diviene importante ora definire quante rotazioni compie la turbina a regime, ovvero con un vento di 16 m/s.

Già in precedenza si è definito il T.S.R.

$$\text{Tip Speed Ratio} = T.S.R. = \frac{\text{vel.tang.pale}}{\text{vel.ventoindisturbato}} = 3$$

quindi si è potuto ricavare la velocità tangenziale delle pale che sarà :

$$\text{vel.tang.pale} = T.S.R. * \text{vel.vento indisturbato}$$

Da cui si avrà:

$$\text{vel.tang.pale} = 3 * 16 = 48 \text{ m/s}$$

Si è potuta determinare la velocità angolare che sarà:

$$\omega = \frac{\text{vel.tang.pale}}{\text{raggio rotore}} = \frac{48}{5} = 9,6 \frac{\text{rad}}{\text{sec}}$$

dove il raggio del rotore è il raggio al quale si trovano i profili considerando come centro del cerchio l'asse del rotore.

Si è poi trasformata la velocità angolare (rad/sec) in giri al minuto(rpm)

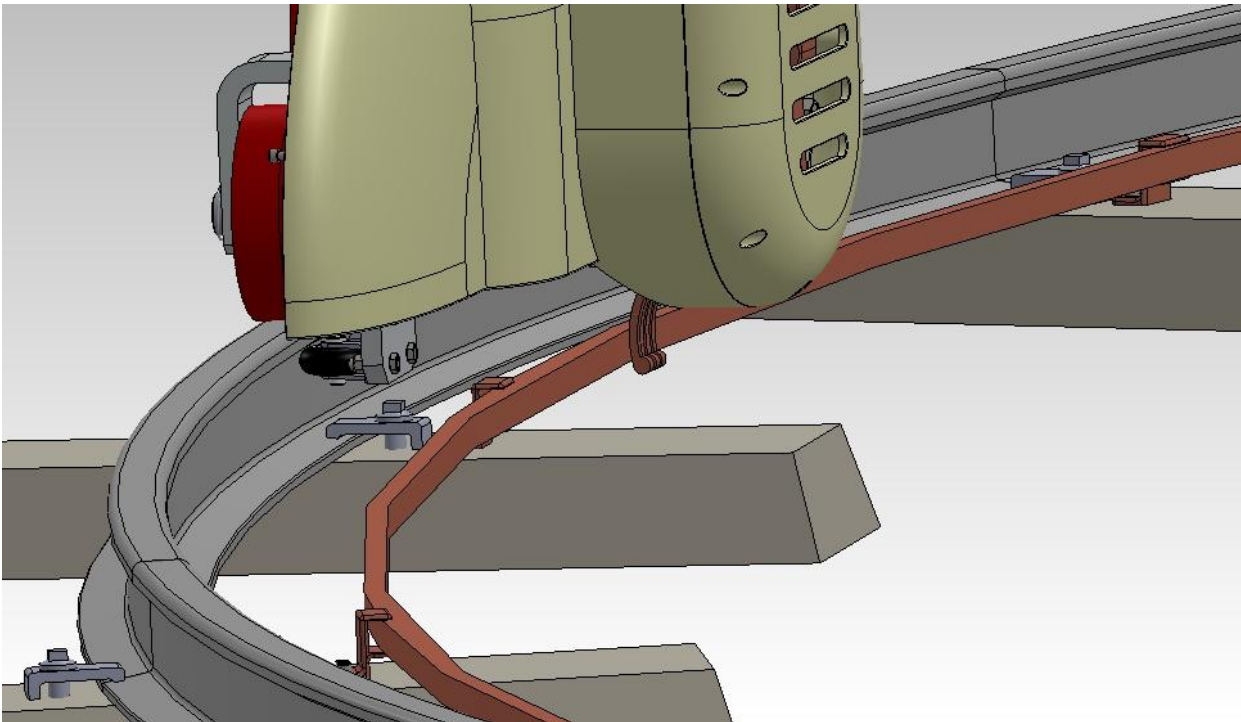
$$\text{Rotaz}_{\text{Rotore(rpm)}} = \frac{\omega 60}{2\pi} = \frac{9.6 * 60}{2\pi} = 91.67 \text{ rpm}$$

Risulta ora immediato ricavare quante rotazioni compie la ruota del generatore al minuto nelle condizioni di regime:

$$\text{Rotaz}_{\text{Ruota (rpm)}} = \text{Rotaz}_{\text{Ruota}} * \text{Rotaz}_{\text{Rotore(rpm)}} = 26,42 * 91.67 = 2422 \text{ rpm}$$

Quindi si ottiene proprio il valore voluto senza ricorrere a riduttori o moltiplicatori di giri, risparmiandosi così molto sulle perdite di carico.

Per la trasmissione dell'energia elettrica, non potendo contare su un unico generatore centrale come nelle soluzioni classiche, si è pensato di ricorrere ad una corona, coassiale con la rotaia, a cui viene ceduta l'energia elettrica da appositi contatti striscianti collegati al generatore (Fig. 3.10.6).



*Fig. 3.10.6: Particolare dei contatti striscianti utilizzati nella turbina*

Si è scelta questa particolare forma per i contatti striscianti, perché , trovandosi all'interno del sistema di conduzione, all'aumentare del regime di rotazione e quindi della forza centrifuga, vengono spinti verso il conduttore e non allontanati come sarebbe capitato se fossero stati posizionati all'esterno.

### **3.11 ROTAIA E CARRELLI**

Un aspetto molto importante è stata la progettazione del sistema di guida carrelli-rotaia. La rotaia è stata realizzata perché come già accennato consente di scaricare a terra il peso dell'intera struttura senza ricorrere alla costruzione di imponenti fondamenta evitando comunque possibili rischi di ribaltamento e poi costituisce un percorso guidato per il rotore della turbina durante la rotazione che quindi ne favorisce il corretto funzionamento. Si è deciso di utilizzare un semplice binario di tipo ferroviario (Fig. 3.11.1), infatti soddisfa appieno le esigenze di progetto pur essendo molto economico.



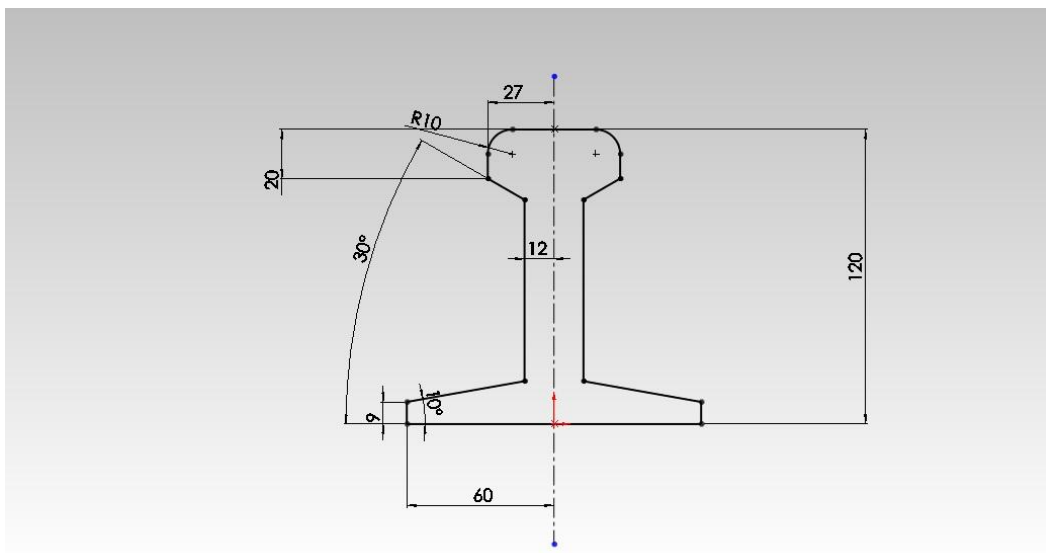


Fig. 3.11.1: Sezione del binario utilizzato per la rotaia

La rotaia assemblata (Fig. 3.11.5) ha un raggio di 5550 mm ed è costituita assemblando fra loro dieci diversi elementi la cui lunghezza massima è di circa 3000 mm.

I vari binari (Fig. 3.11.3) vengono uniti fra loro e a loro volta fissati alle traversine con un tipico sistema ferroviario costituito da componenti di fissaggio e bulloni M 20 (Fig. 3.11.2). Le traversine (Fig. 3.11.4) vengono adottate in cemento (sono le uniche in commercio), opportunamente spaziate tra loro costituiscono la base di appoggio della rotaia, si decide di disporle una ogni 18°, risultando quindi in totale 20.

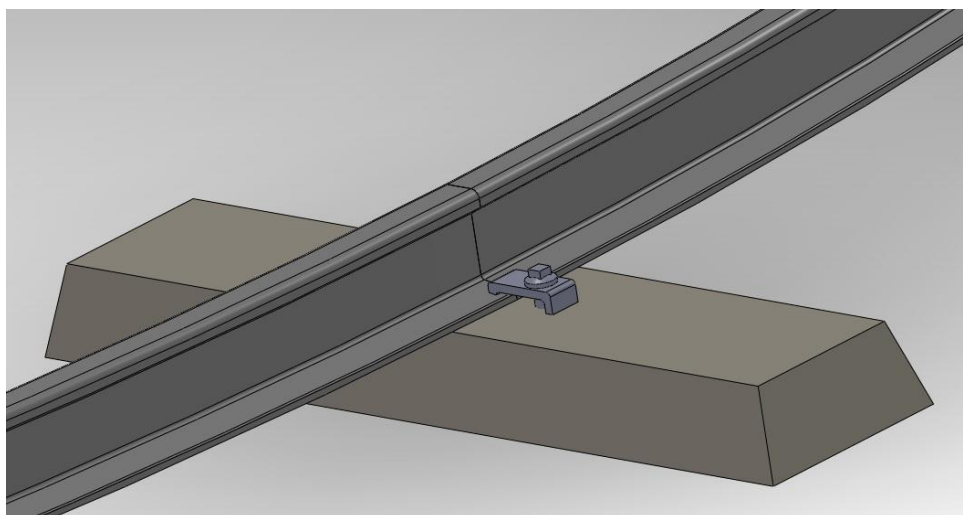
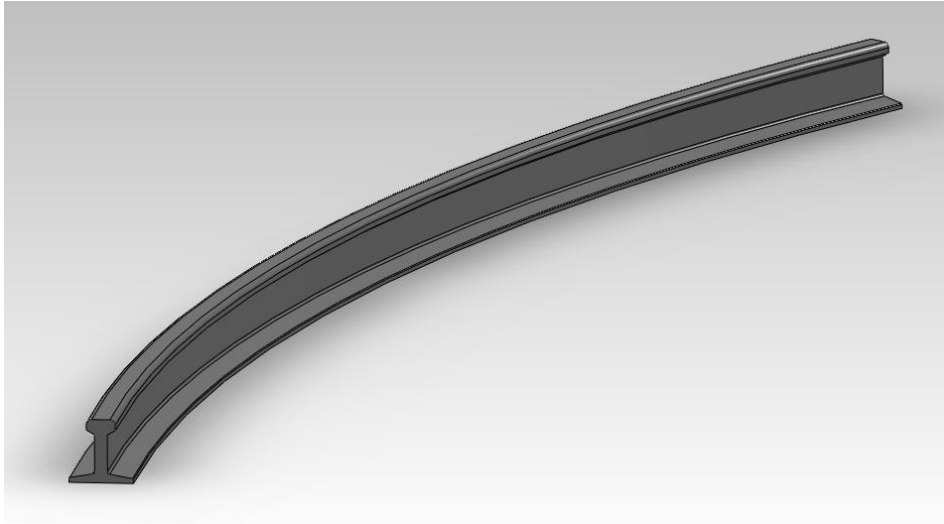
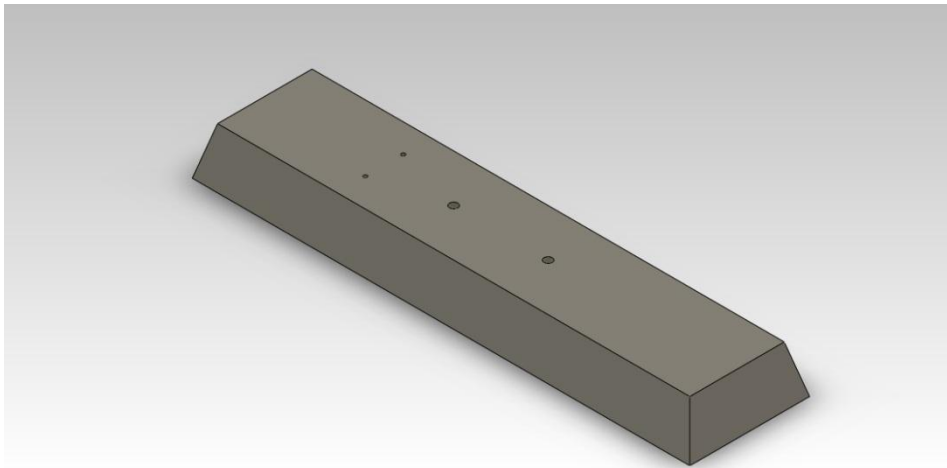


Fig. 3.11.2: Particolare del sistema di bloccaggio dei binari





*Fig.3.11.3: Uno dei dieci binari costituenti la rotaia circolare*



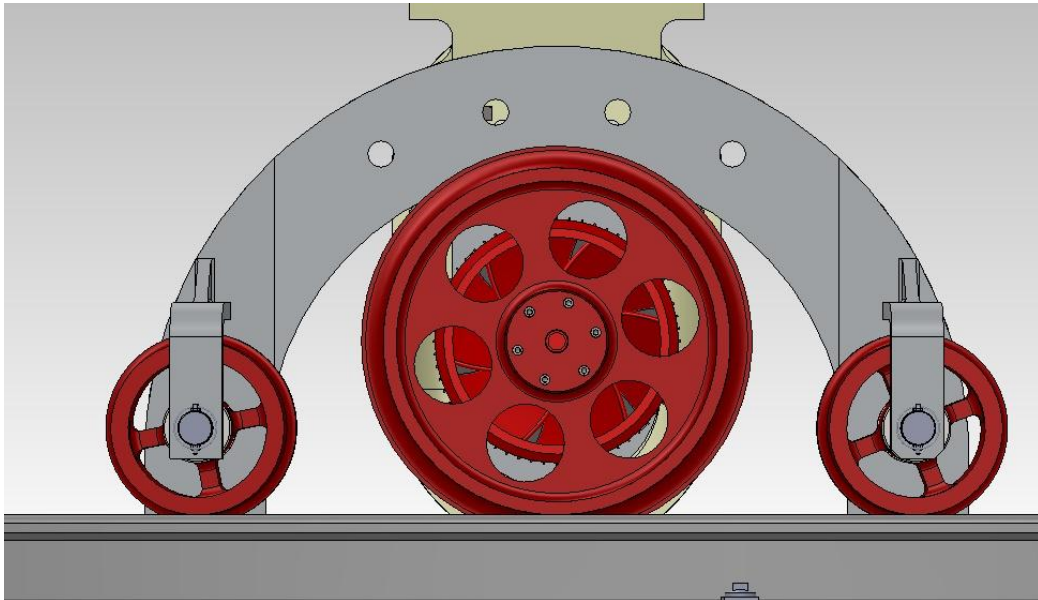
*Fig. 3.11.4: Traversina in cemento*



*Fig.3.11.5: La rotaia nel suo complesso*

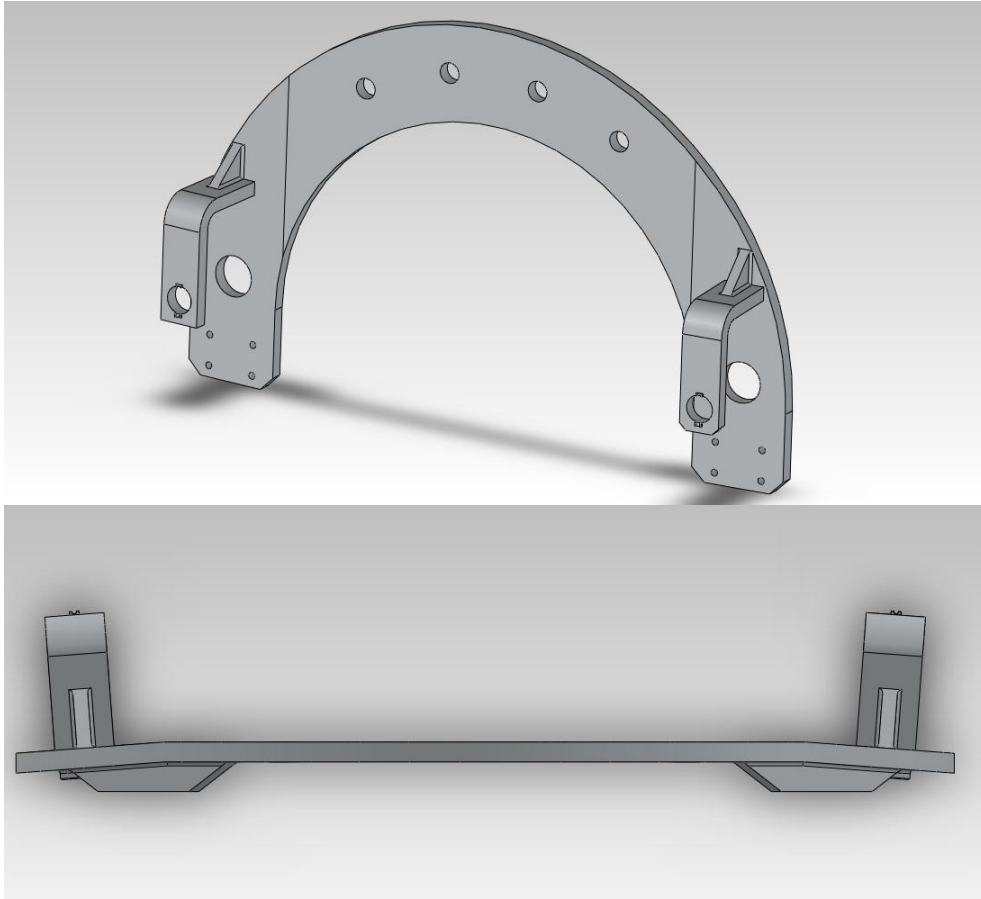
Per sorreggere il rotore e abbinarlo alla rotaia è stato definito un particolare sistema di carrelli. Ogni carrello (Fig. 3.11.6) è costituito da 5 ruote:

- due laterali aventi diametro pari a 200 mm;
- due ruote di sostegno posteriori avente un diametro di 70mm;
- una ruota centrale con un diametro di 420 mm;



*Fig. 3.11.6: Vista frontale del carrello porta generatore*

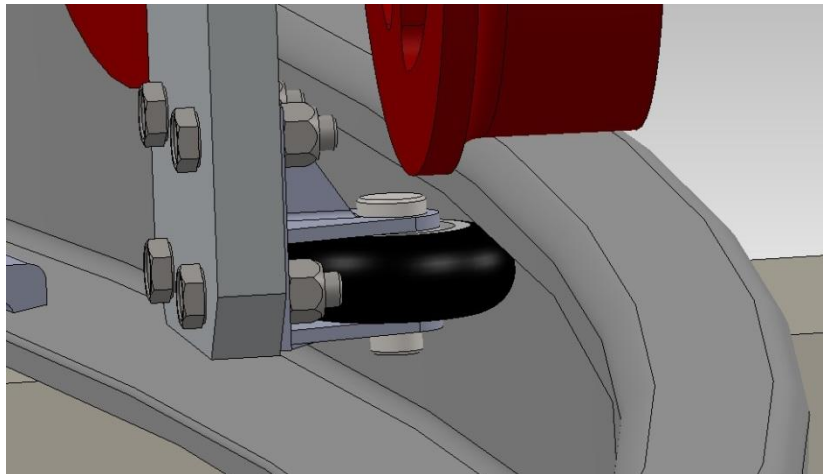
Il carrello è costituito da una grande piastra a forma circolare (Fig. 3.11.7) a cui sono stati saldati i componenti per l'alloggiamento dei perni delle ruote. Essa non è perfettamente piana, ma è stata piegata ai due estremi per farle assecondare il raggio di curvatura della rotaia.



*Fig. 3.11.7: Elemento portante dei carrelli del generatore*

E' stata scelta questa particolare forma per far sì che la grande ruota centrale, ovvero l'unica solidale all'albero del generatore non fosse soggetta al carico della struttura sovrastante, che invece grava sulle due ruote laterali da 200mm. In questo modo si evita la sollecitazione a flessione rotante all'albero del generatore.

Funzione fondamentale svolgono le ruotine più piccole che fino ad ora sono state solo accennate.



*Fig. 3.11.8: Ruotine posteriori*

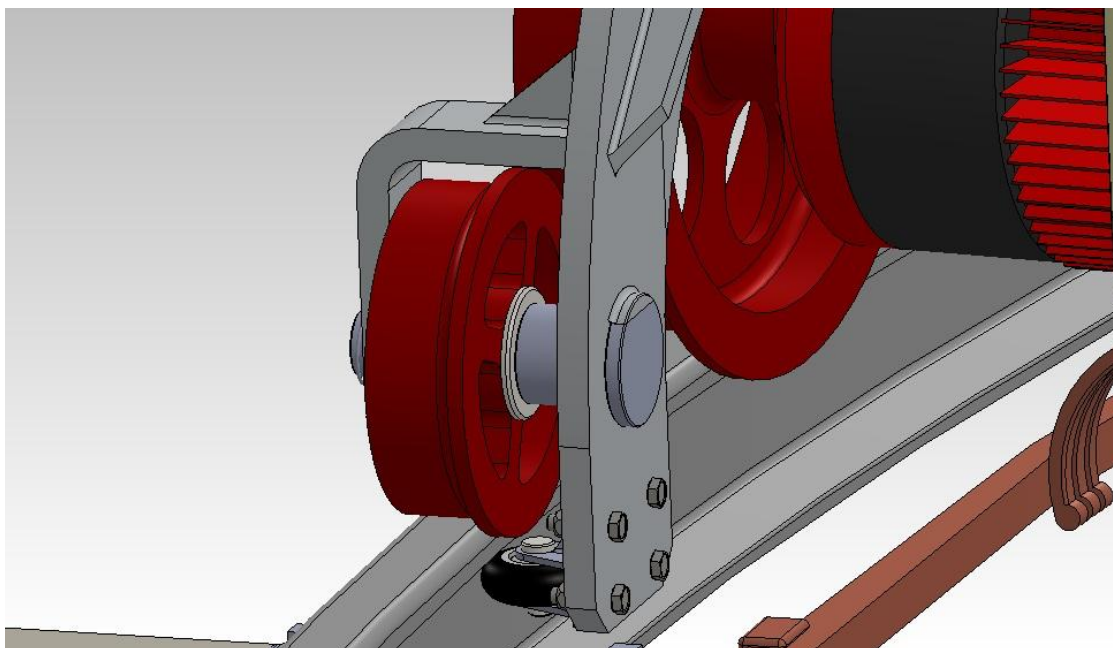


Fig 3.11.9: Altra vista delle ruote posteriori

Le ruotine posteriori, oltre a migliorare il centraggio del rotore, svolgono il fondamentale compito di impedire il ribaltamento della turbina, infatti come si può vedere bene nelle figure 3.11.8 e 3.11.9 esse ruotano tangenti al profilo obliquo che si trova a lato dei binari, quindi in caso di un qualsiasi accenno al ribaltamento, si impuntano contro tale superficie e lo impediscono.

Per fissare le ruote da 200 mm vengono utilizzati dei perni in acciaio inossidabile (Fig. 3.11.10 b) opportunamente sagomati per tenerle alla giusta quota rispetto al binario. La testa del perno presenta una parte spianata per accoppiarlo nella giusta posizione con la piastra di sostegno. Per il suo fissaggio viene utilizzata una semplice copiglia a scatto (Fig. 3.11.10 a).

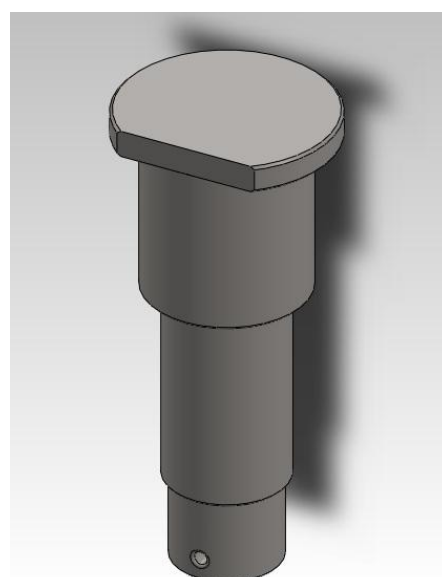
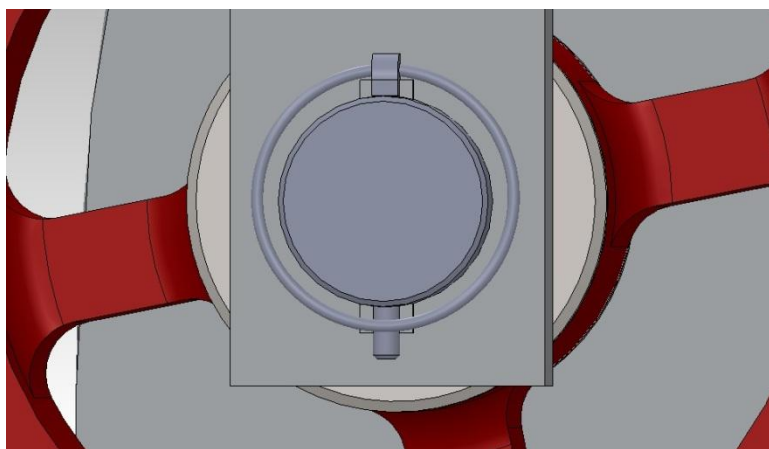
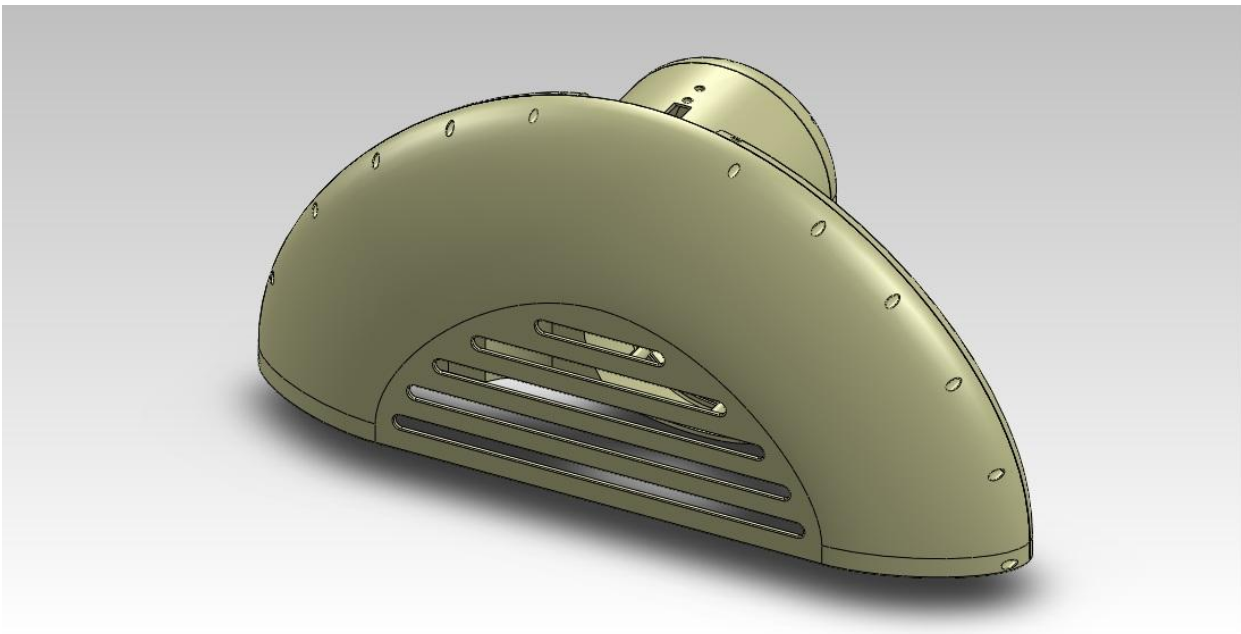


Fig. 3.11.10 a : Copiglia a scatto per il fissaggio del perno Fig.3.11.10 b: Perno di sostegno ruote

Durante il funzionamento, il vento, gli agenti atmosferici e quant'altro possono pregiudicare il funzionamento del generatore sostenuto dai carrelli, o possono addirittura apportare elementi estranei sulla rotaia, per ovviare a questi problemi, si è deciso di adottare un carter (Fig. 3.11.11) che ricopre tutto il sistema. Tale carter, presentando un profilo quasi tangente alla rotaia è in grado anche di spostare eventuali elementi che per qualsiasi natura possono trovarsi sulla rotaia. E' stato dotato di due coperchi per favorire operazioni di manutenzione sia sul lato generatore, sia sul lato ruote.



*Fig. 3.11.11: Il carter utilizzato a protezione del carrello*

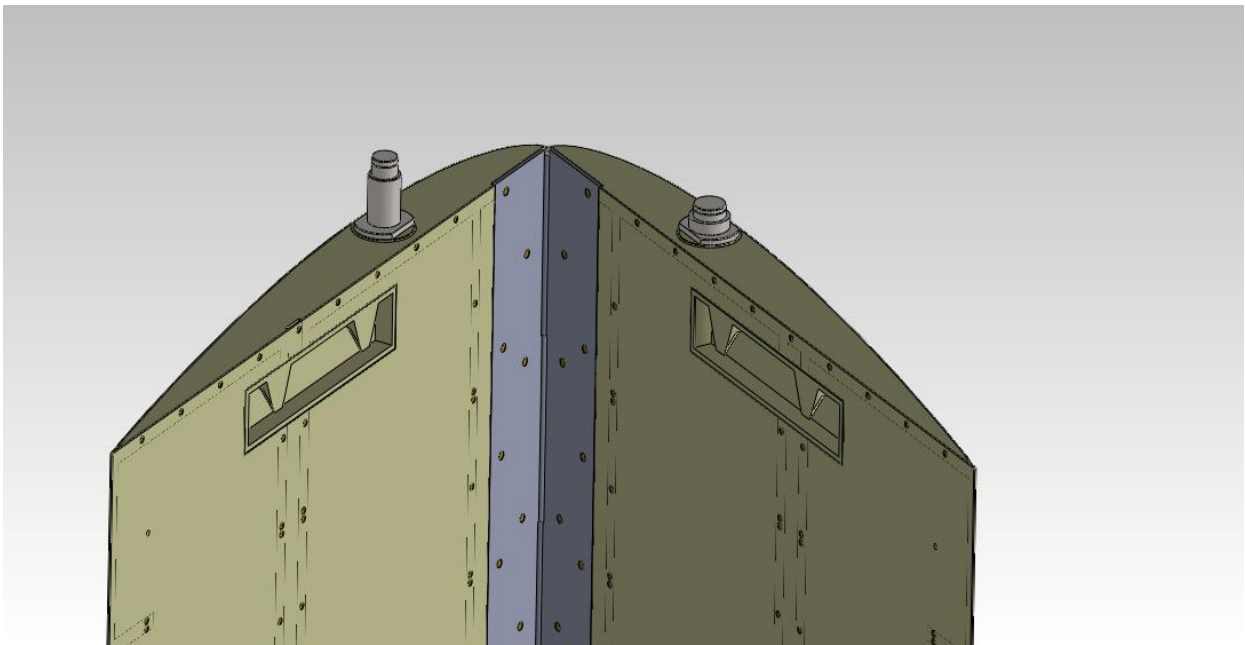
## CAPITOLO 4

# IL MONTAGGIO

### 4.1 MONTAGGIO DEI SINGOLI COMPONENTI

La filosofia che è stata alla base di ogni singola fase della progettazione è stata quella di avere pezzi semplici e facili da montare.

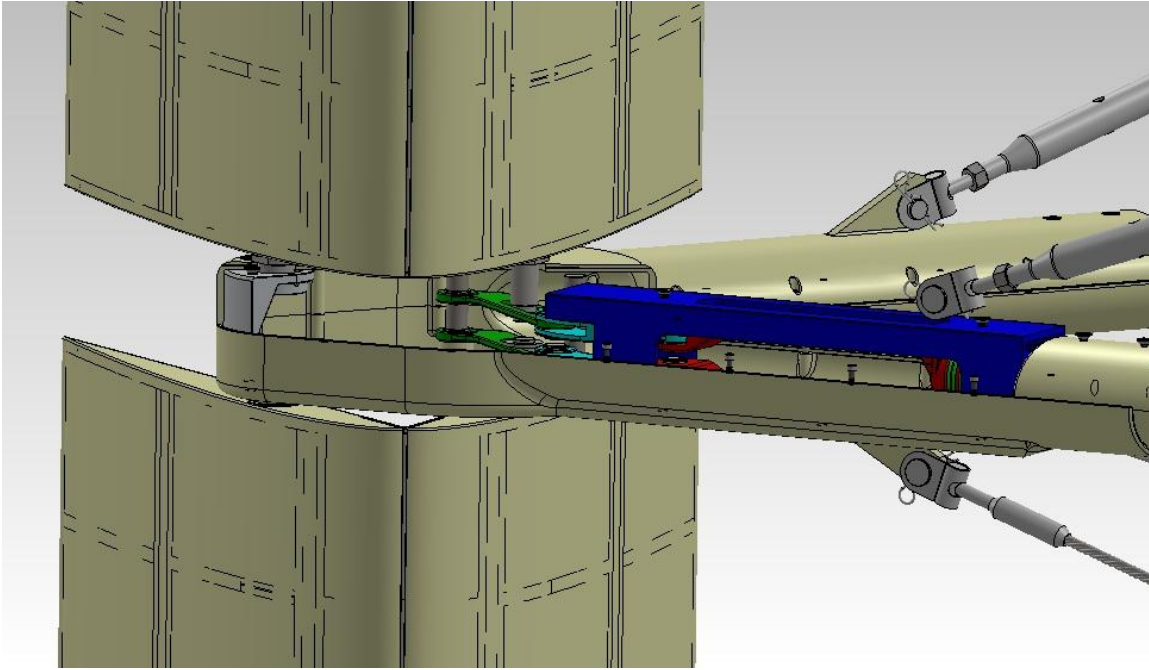
Se si considerano ad esempio due semi profili palari accoppiati ( Fig. 4.1.1), si può notare, come siano state previste nella faccia piana, degli incavi dotati di due ganci, per far sì di poterli sollevare e portare al piano in cui devono essere montati , volendo anche con una semplice corda.



*Fig. 4.1.1: Semi profili accoppiati tramite cerniera interna, notare gli incavi per il sollevamento*

Il loro bloccaggio (Fig. 4.1.2) presso i cuscinetti e i sistemi di apertura dei profili viene eseguito con normali anelli elastici, mantenendo il componente di giunzione dei bracci

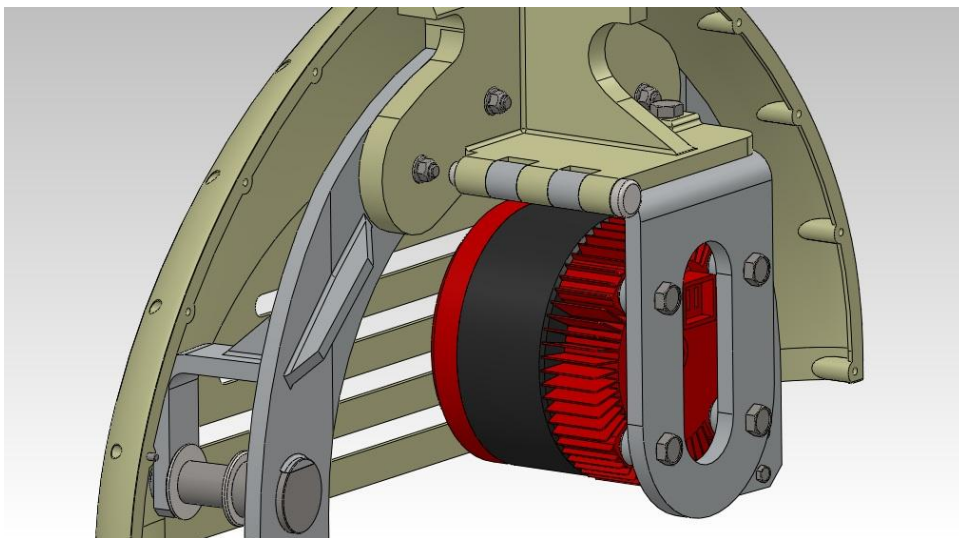




*Fig. 4.1.2: Sistema di bloccaggio dei profili*

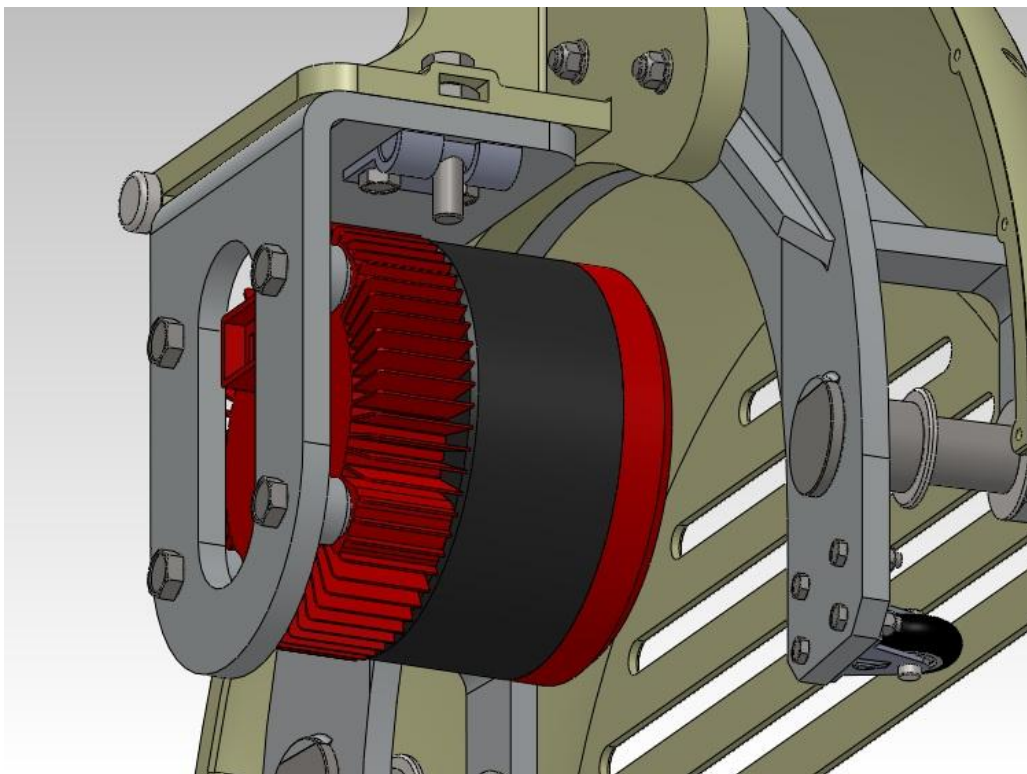
aperto grazie al coperchio, come già accennato, scomponibile in due parti. Una volta eseguito il collegamento, si montano entrambi i coperchi e si può passare volendo, al montaggio dei tiranti.

I carrelli, sono stati dimensionati con quella forma caratteristica a semicerchio per non far gravare il peso dell'intera struttura sulla ruota del generatore, ma anche per far sì di poter montare il generatore anche a struttura ultimata, oppure di smontarlo per operazioni di manutenzione senza dover effettuare operazioni complicate. Infatti il motore è collegato con quattro bulloni a una piastra (Fig. 4.1.3), che ad un estremità



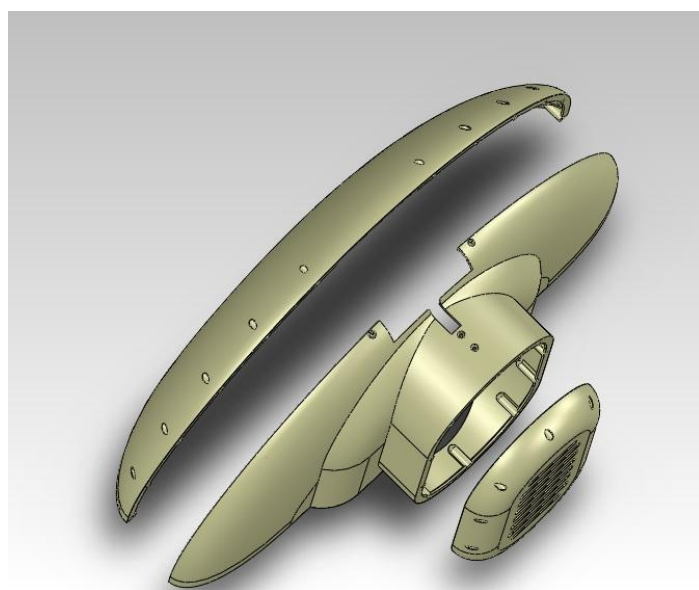
*Fig. 4.1.3: Sistema di bloccaggio del generatore*

è incernierata, mentre dall'altra parte presenta una vite (Fig. 4.1.4) con un perno dotato di foro filettato, consente di regolare la posizione del motore e quindi della ruota. La regolazione può rendersi necessaria per molteplici motivi, come ad esempio l'usura dei componenti accoppiati a rotolamento.



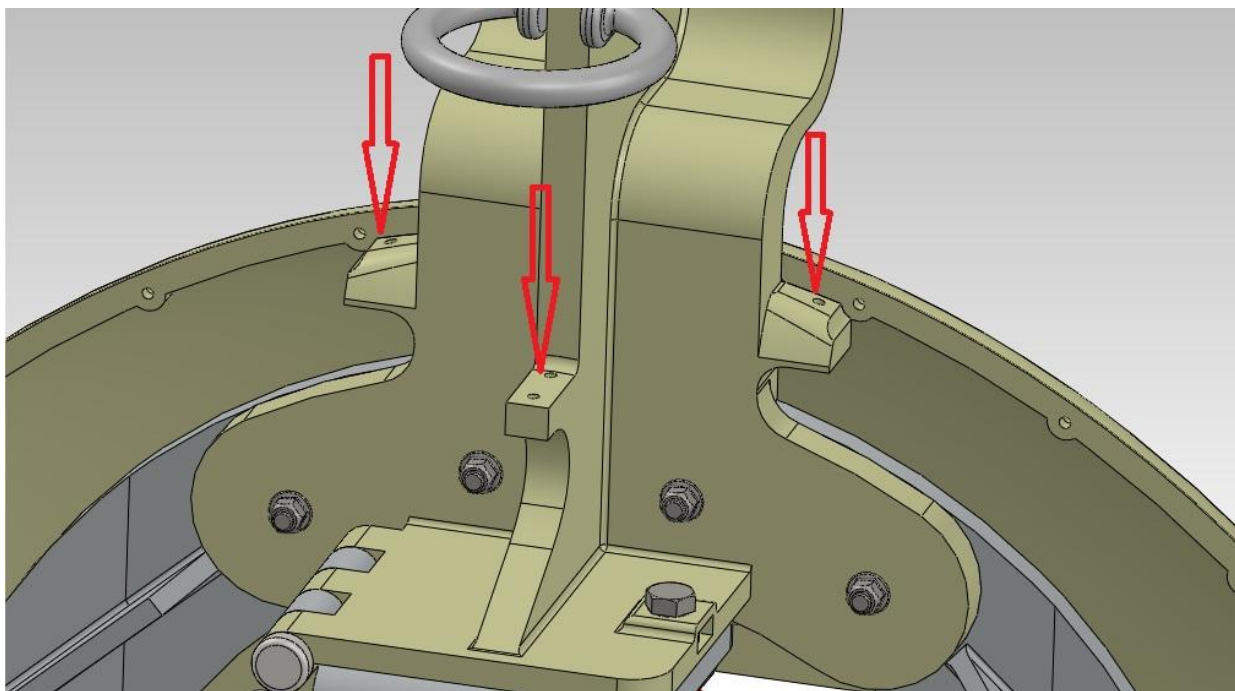
*Fig. 4.1.4: Sistema di regolazione posizione generatore*

Da notare che anche il carter che protegge il gruppo generatore presenta una forma che non è casuale (Fig. 4.1.5), è stato diviso in tre parti: un corpo centrale e due coperchi. Il coperchio più grande, quello frontale, permette se rimosso, al corpo centrale di alloggiarsi presso gli opportuni sostegni (Fig. 4.1.6) previsti nel sistema che sorregge il generatore, oltre che consentire le normali operazioni di manutenzione sul “lato ruote”.



*Fig. 4.1.5: Esposizione del carter*

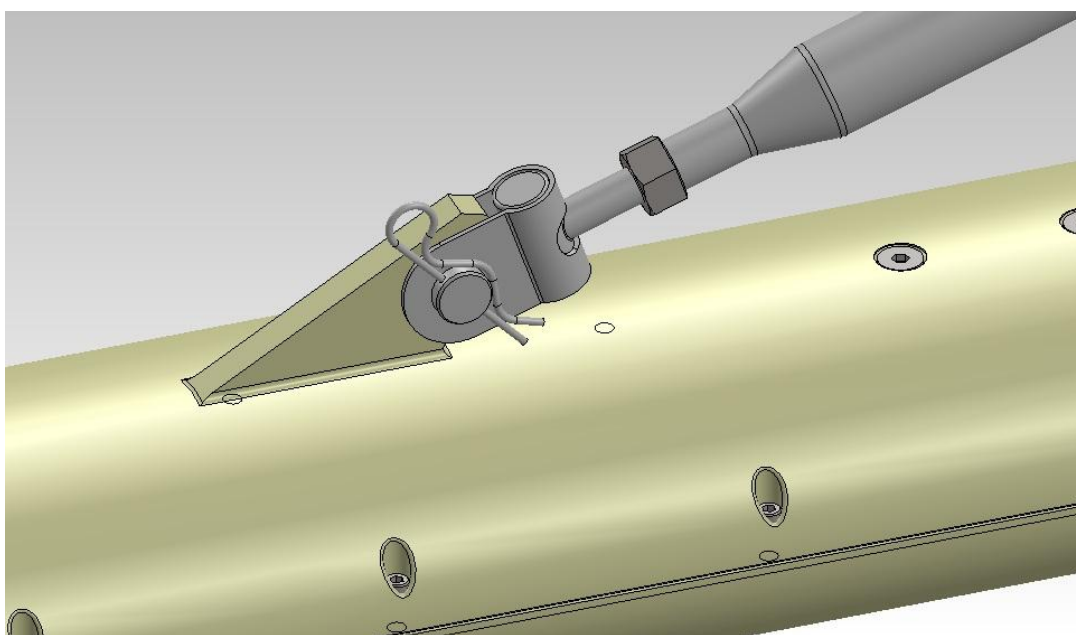




*Fig. 4.1.6: Con le frecce rosse sono indicati i supporti del carter, che presentano 4 fori filettati M8 per il bloccaggio*

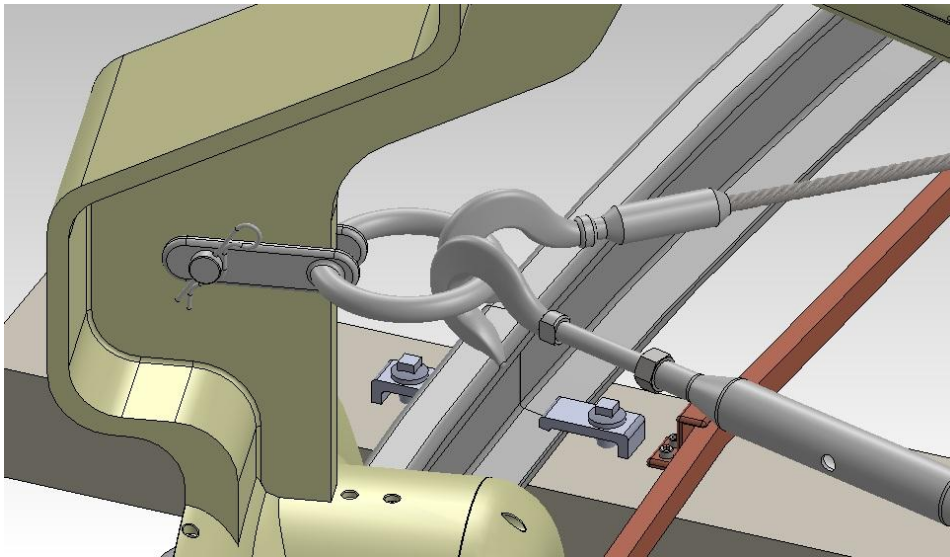
Il coperchio più piccolo invece consente di eseguire qualsiasi tipo di operazione sul generatore.

Per quel che riguarda i tiranti obliqui invece, il loro montaggio è molto semplice, infatti, per bloccarli si è deciso di utilizzare un semplice perno fermato da una copiglia.



*Fig. 4.1.6: Particolare del bloccaggio dei tiranti obliqui*

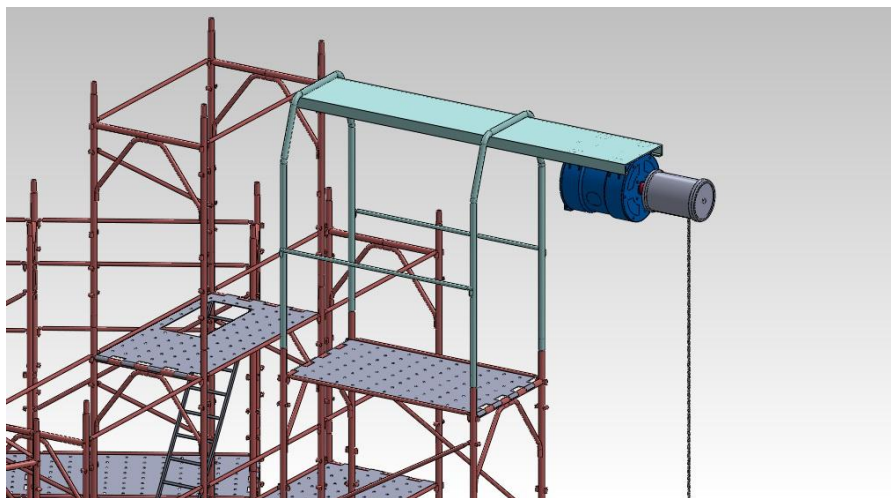
I tiranti orizzontali invece sono stati dotati di ganci che li impegna ad un anello, che mediante un altro sistema perno - copiglia è bloccato al supporto del generatore (Fig. 4.1.7).



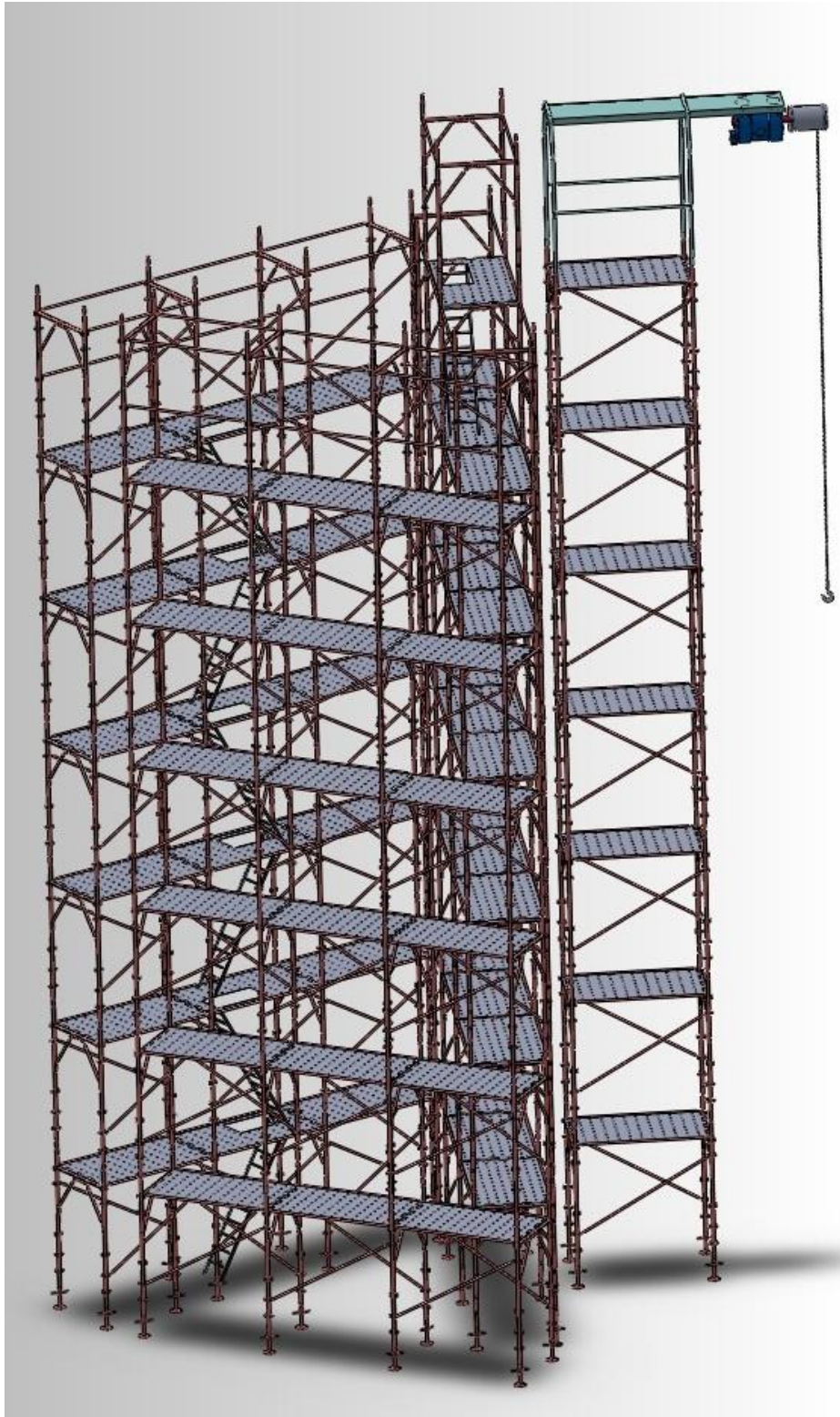
*Fig. 4.1.7: Particolare del sistema di bloccaggio dei tiranti orizzontali*

## **4.2 MONTAGGIO DEL COMPLESSIVO**

Per quel che riguarda il montaggio complessivo della turbina, per soddisfare le specifiche di progetto, si è deciso di non sfruttare gru di grosse dimensioni o mezzi pesanti, perciò per poter portare i pezzi nelle posizioni richieste, può essere utilizzato un semplice argano elettrico montato su un ponteggio come quelli usati per piccoli lavori in edilizia (Fig. 4.2.1, 4.2.2, 4.2.3).



*4.2.1: Particolare del piccolo argano elettrico utilizzato per il sollevamento dei componenti*



*Fig. 4.2.2: Ponteggio utilizzato per il montaggio della turbina*





*Fig. 4.2.3: Turbina assemblata e relativa impalcatura*



## ***CAPITOLO 5***

# ***STUDIO AGLI ELEMENTI FINITI***

### ***5.1 ESECUZIONE DELLO STUDIO***

Dopo aver dimensionato con il metodo di progettazione classico i vari elementi, (soprattutto quelli caratterizzati dalla maggior semplicità costruttiva) si è voluta effettuare anche una verifica anche agli elementi finiti per valutare se i risultati ottenuti fossero conformi con le sollecitazioni ipotizzate.

Si riportano quindi di seguito le analisi agli elementi finiti effettuate con l'applicazione "Solidworks Simulation" di "SolidWorks 2011". Per ogni componente verrà riportata la sua foto, quella della mesh con i carichi (in viola) e i vincoli (in verde) e quella dei risultati (tensione di Von Mises).

**Anima della pala portante** (Fig. 5.1, 5.2, 5.3):

Carichi:

Si è considerato un carico di 13335N agente sulla faccia superiore dovuto alla forza peso della struttura sovrastante e una forza centrifuga laterale pari a 25344 N

Materiale:

Alluminio 7075-T6 (SN)

Risultati:

Si è ottenuta una sollecitazione massima pari a 409 MPa, a cui corrisponde un C.S. pari a 1,2.

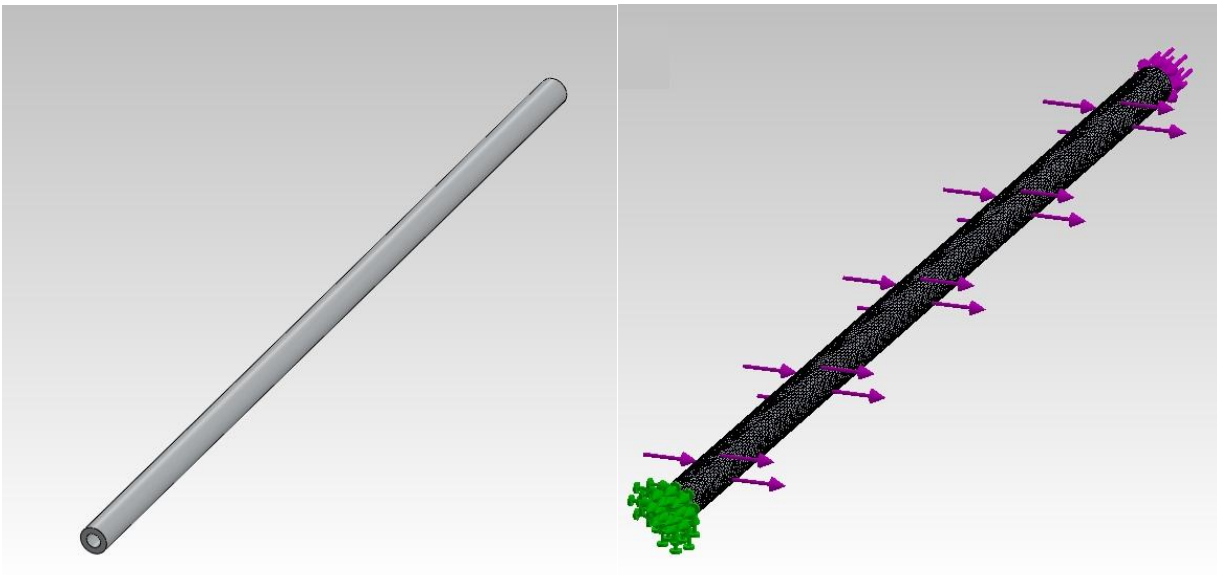


Fig. 5.1: Rappresentazione dell'anima a destra e a sinistra la sua mesh e i relativi carichi applicati

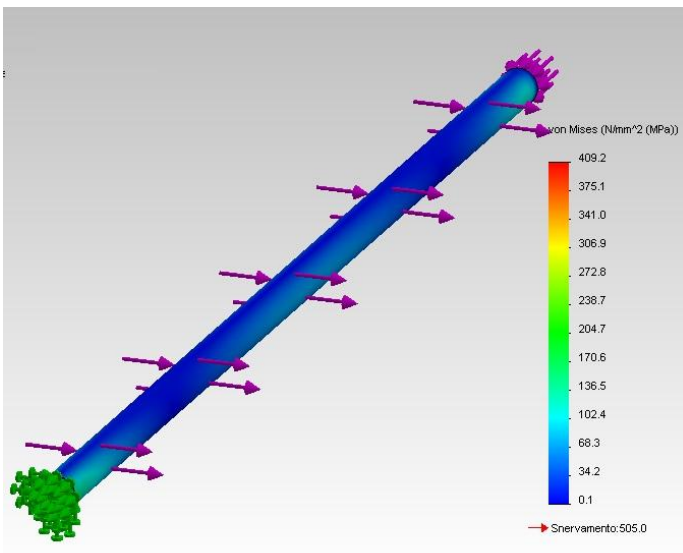


Fig. 5.2: Tensioni di Von Mises sull'anima della pala

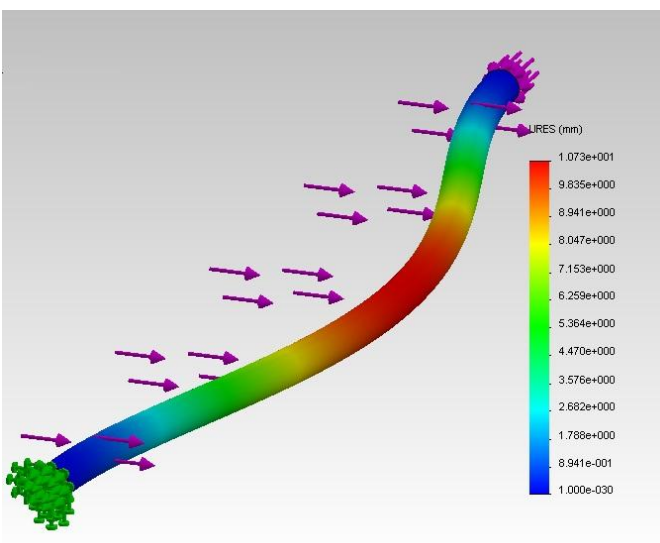


Fig. 5.3: Andamento degli spostamenti, il valore massimo lo si avrà ovviamente nel mezzo

**Perno di sostegno delle pale (Fig. 5.4, 5.5):**

Carichi:

Si è considerato un carico di 17000N agente sulla faccia superiore dovuto alla forza peso della struttura sovrastante e una forza centrifuga laterale pari a 12672 N

Materiale:  
Acciaio inossidabile DIN 1.4306 (X2CrNi19-11)

Risultati:

Si è ottenuta una sollecitazione massima pari a 63,3 MPa, a cui corrisponde un C.S. pari a 7,3.

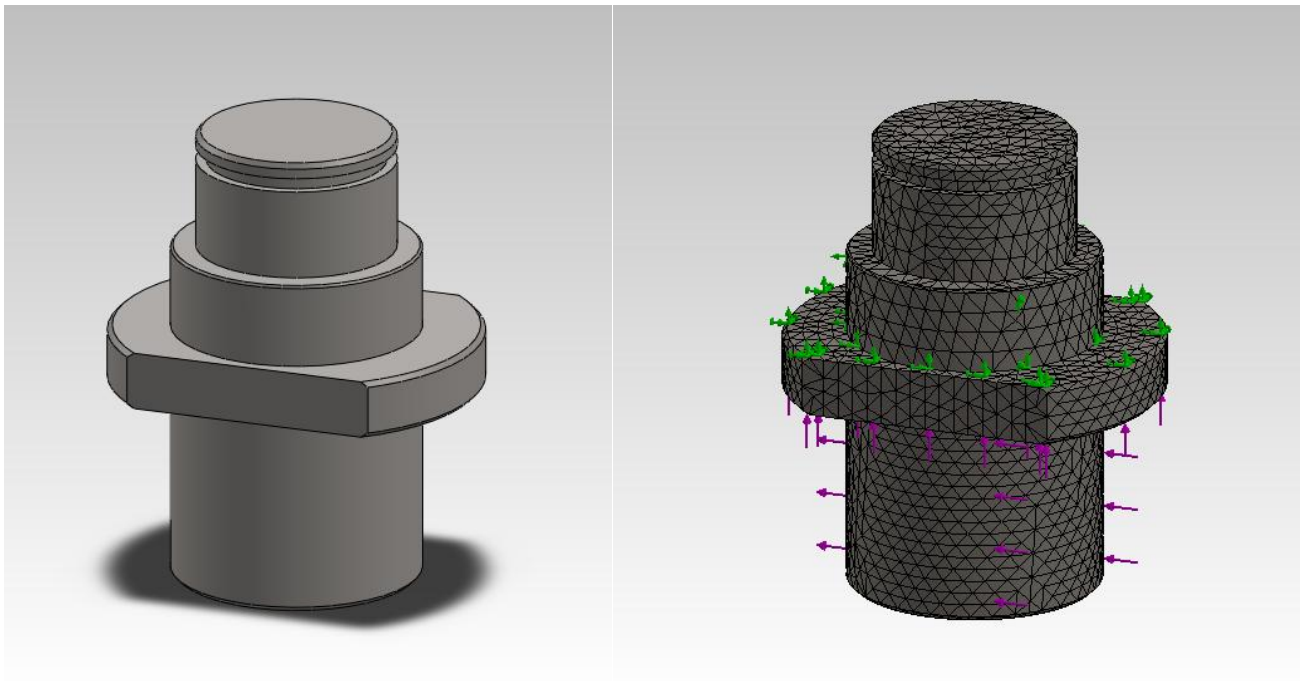
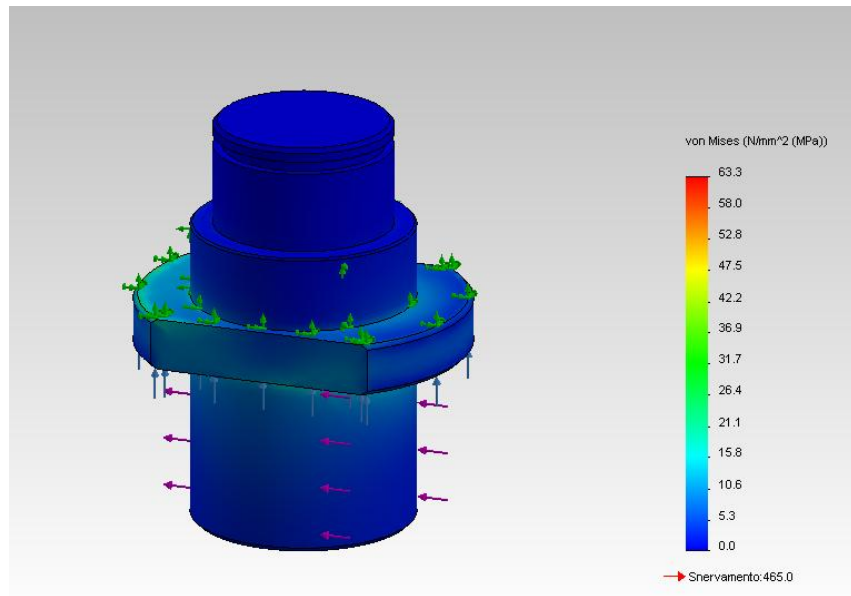


Fig. 5.4: Rappresentazione del perno a destra e a sinistra la sua mesh e i relativi carichi applicati

Fig. 5.5: Tensioni di Von Mises sul perno





**Piastra circolare del carrello porta generatore (Fig. 5.6, 5.7):**

Carichi:

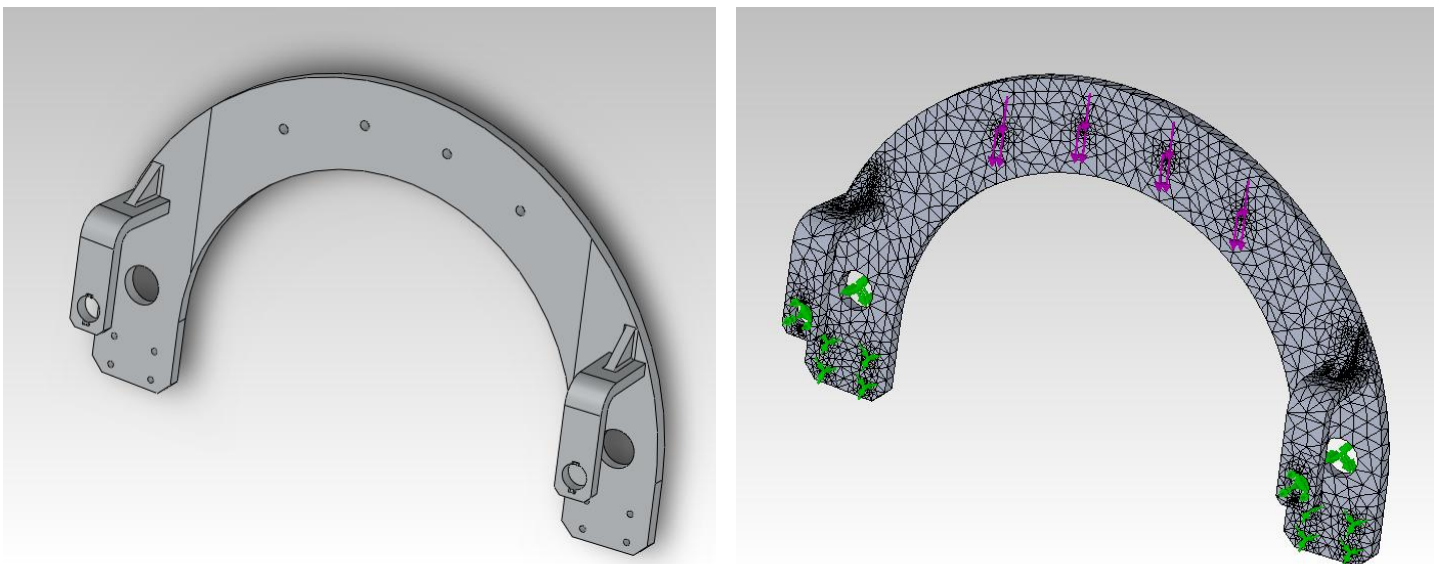
Si è considerata la forza peso della struttura sovrastante di 17135 N ripartita sui quattro bulloni.

Materiale:

Alluminio 3.0205 (EN AW-1200).

Risultati:

Si è ottenuta una sollecitazione massima pari a 14,3 Mpa, a cui corrisponde un C.S. pari a 14,2.



*Fig. 5.6: Rappresentazione della piastra a destra e a sinistra la sua mesh e i relativi carichi applicati*

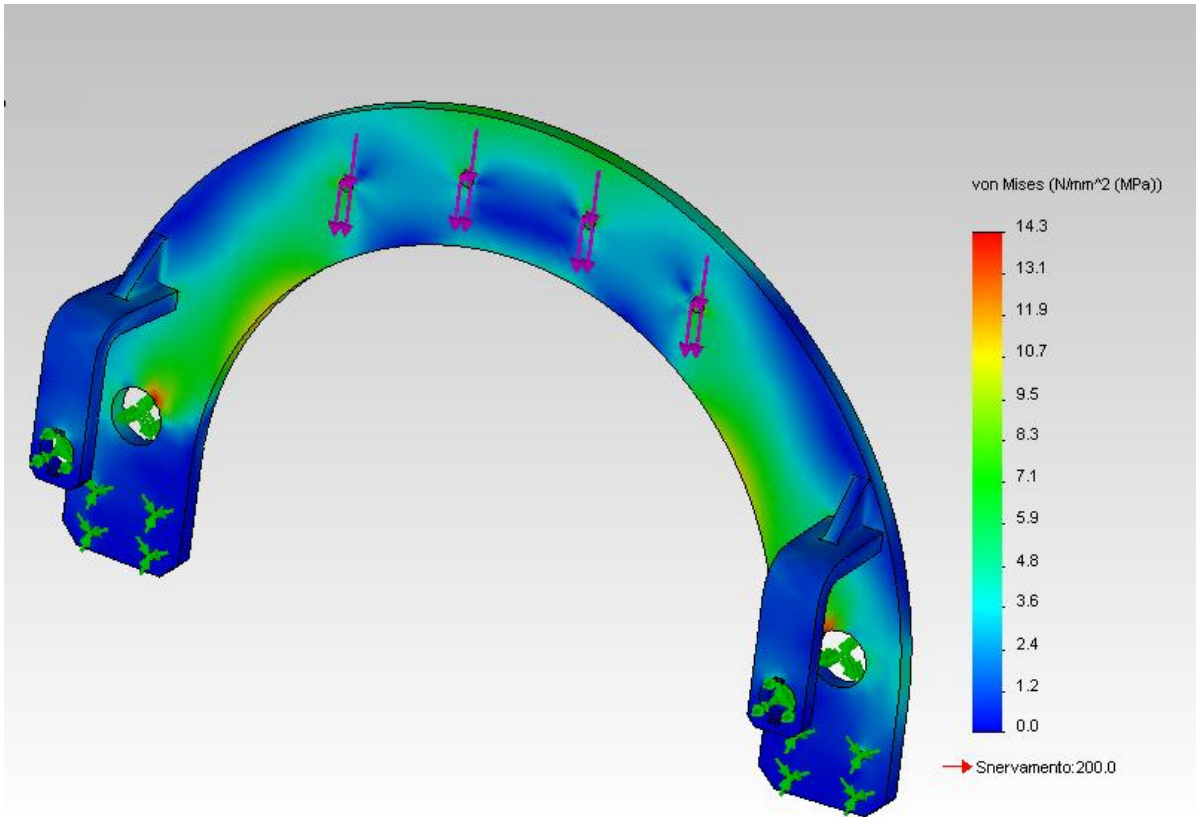


Fig. 5.7: Tensioni di Von Mises sulla piastra

**Elemento di collegamento tra rotore e carrelli (Fig. 5.8, 5.9):**

Carichi:

Si è considerata la forza peso della struttura sovrastante di 17000 N ripartita sulla superficie superiore.

Materiale:

Alluminio 3.0205 (EN AW-1200).

Risultati:

Si è ottenuta una sollecitazione massima pari a 50,7 MPa, a cui corrisponde un C.S. pari a 3,9.

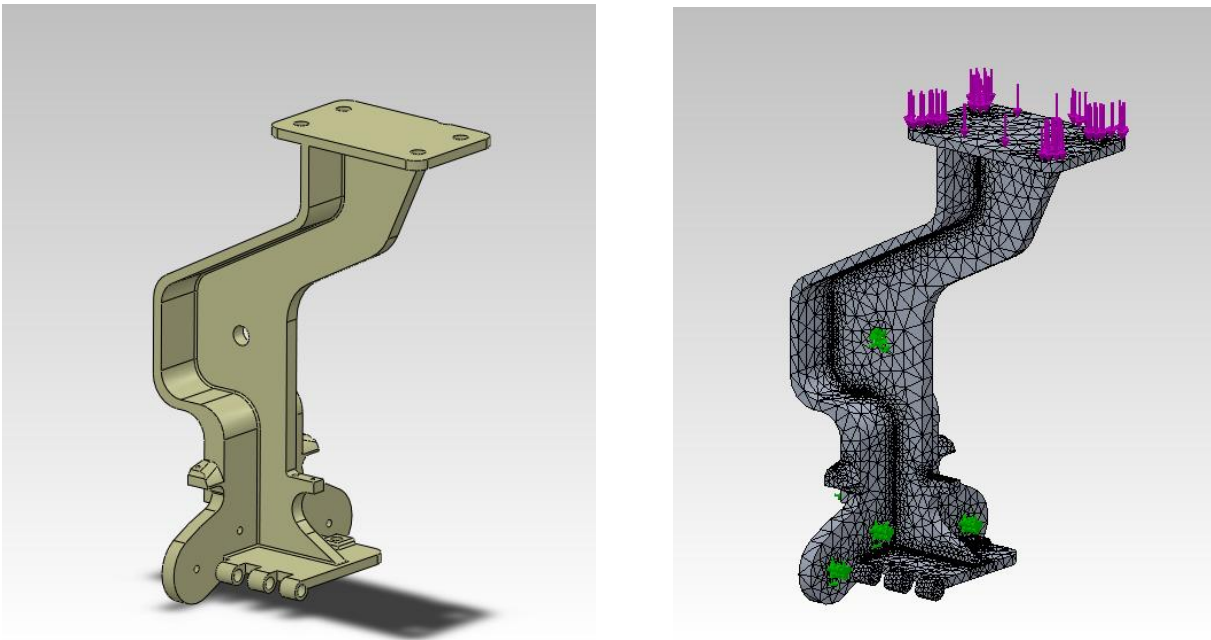


Fig. 5.8: Rappresentazione del supporto a destra e a sinistra la sua mesh e i relativi carichi applicati

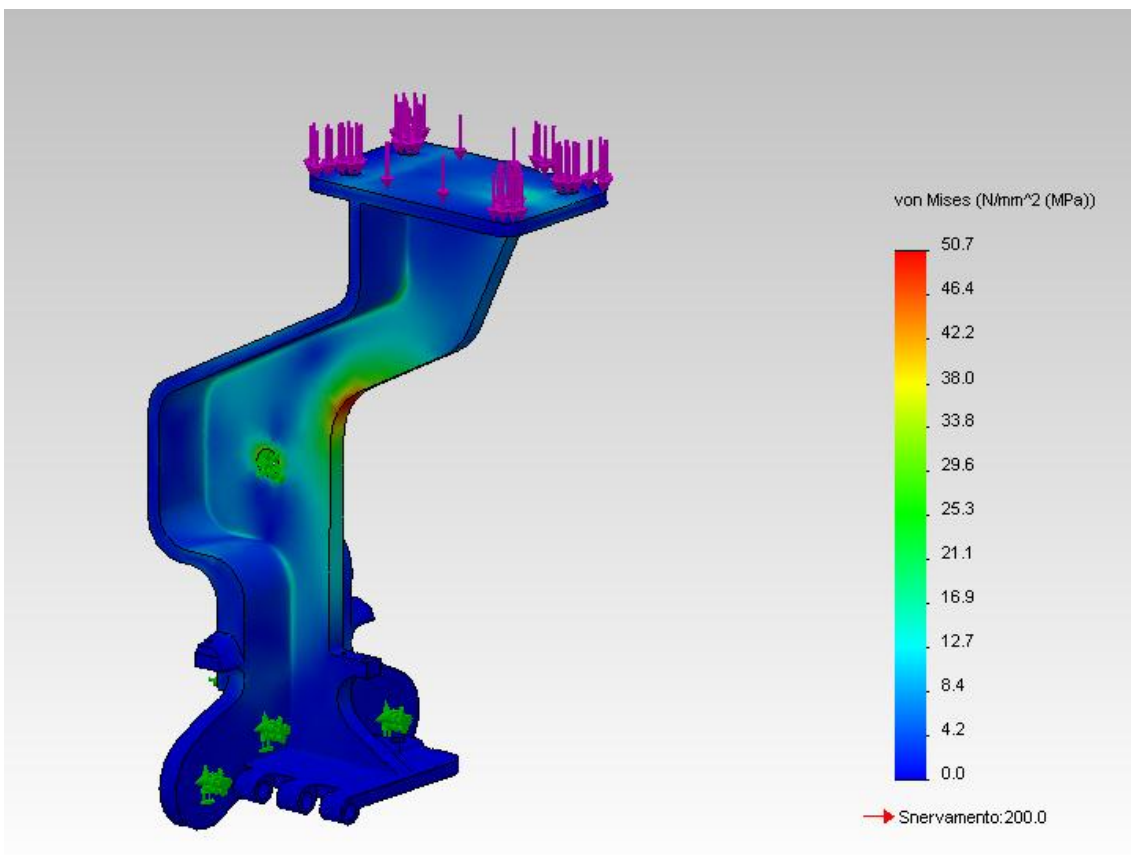


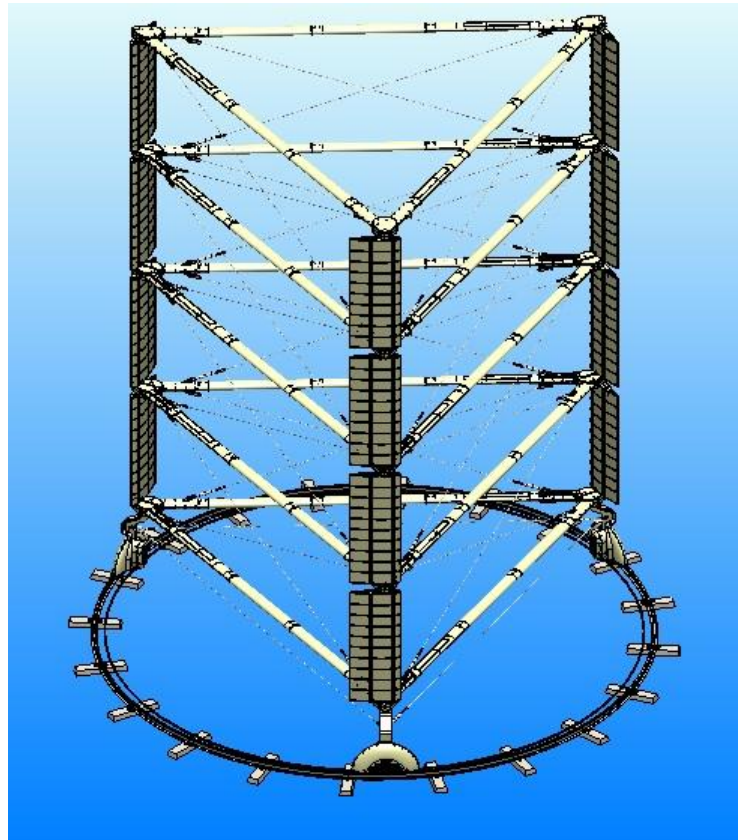
Fig. 5.9: Tensioni di Von Mises sul supporto

## CAPITOLO 6

# CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'energia eolica è una forma di energia pulita e totalmente rinnovabile che non va minimamente ad intaccare l'ecosistema in cui viene sfruttata.

Spesso vi è chi ne critica l'aspetto visivo, senza però considerare i benefici che tale forma di energia comporta, infatti se nell'imminente futuro non si ricorresse ad un uso su larga scala di energie rinnovabili, l'esistenza del mondo stesso e dei suoi ecosistemi sarebbe a rischio.



*Fig. 6.1: Vista trimetrica della turbina assemblata*

## CAPITOLO 6: CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Forse questa risulta essere una visione un po' troppo pessimistica del futuro, in ogni caso, in ambito energetico, ciò che spinge ad effettuare la scelta della tipologia di produzione di energia più idonea deve essere la logica del male minore e l'impatto visivo, rispetto all'inquinamento dell'ambiente circostante che può comportare ad esempio una centrale termoelettrica è il male minore.



*Fig. 6.2: Esempio di montaggio dell'aerogeneratore in un contesto agricolo (Strada San Zeno)*

In conclusione si può affermare si sono centrati tutti gli obiettivi che si erano preposti, si è ottenuto un aerogeneratore ad asse verticale (Fig. 6.1, 6.2 e 6.4) che sviluppa una potenza di 100 kW con un vento medio a 16 m/s. L'altezza complessiva della macchina è di circa 12,5 m, il diametro del rotore è 10 m mentre quello della rotaia è di 11,1m.

Il problema dell'avviamento è stato risolto con un sistema semplice e totalmente automatico che non richiede l'utilizzo di nessuna forma di energia ausiliaria.

Rispetto al modello da cui si è preso spunto si è ottenuta una forte diminuzione dei pesi, questo soprattutto grazie alla rimozione della torre di sostegno centrale e alla sostituzione del grande generatore torque (che pesa diverse tonnellate) con tre piccoli generatori brushless (che pesano 19 kg ciascuno).

Risulta chiaro che la riduzione dei pesi, a parità di resistenza comporta infiniti benefici, come ad esempio:

- l'aumento della facilità di trasporto (che può essere effettuato anche tramite piccoli fuoristrada Fig. 6.3) e di montaggio;



- la diminuzione dell'inerzia della macchina, che così presenta un transitorio di avviamento molto minore;

L'assenza totale di fondazione, è l'aspetto fondamentale che determina la convenienza di questo tipo di impianto innovativo rispetto ad un tradizionale impianto eolico ad asse orizzontale, ed anche questo è stato centrato appieno.



*Fig. 6.3: Esempio di un possibile trasporto delle pale eoliche (fonte Daniele Biserni)*

Come già accennato varie volte nell'elaborato, ogni aspetto della progettazione è stato dettato dalla volontà di avere componenti semplici nelle geometrie e nel montaggio, in modo che fossero sia facilmente realizzabili ma anche facilmente montabili. La turbina perciò risulta totalmente assemblabile in cantiere senza richiedere competenze specifiche (i collegamenti sono per lo più bullonati), relegando all'officina pochissime operazioni di saldatura concentrate in un numero veramente esiguo di componenti. Si è optato il più possibile per componenti commerciali (come ad esempio l'utilizzo di binari ferroviari) che hanno a loro volta permesso di abbattere i costi.



*Fig. 6.4: Vista isometrica della turbina assemblata*

L'installazione infine risulta possibile utilizzando solamente un piccolo argano elettrico senza richiedere imponenti gru.

Sarebbe comunque possibile migliorare la macchina sotto diversi aspetti ed in particolare i principali sviluppi futuri a cui si può pensare sono:

- lo studio di un sistema frenante che possa essere attivato automaticamente in caso di venti eccessivi per evitare di avere un sovraccarico dei generatori e ad eccessive forze centrifughe sul rotore, tale sistema potrà essere utilizzato anche per bloccare la macchina per operazioni di manutenzione;
- il miglioramento del foglio elettronico realizzato con “Wolfram Mathematica” introducendo gli effetti della tridimensionalità della pala e quelli dello stallo dinamico;



- testare la macchina con software che permettono di effettuare una profonda analisi fluidodinamica, come studiare la scia prodotta, che in genere risulta maggiore rispetto a quella di una ad asse orizzontale, per poterne valutare quale sia la distanza minima di installazione, oppure migliorare l' aerodinamicità di alcune parti;
- la progettazione di un sistema di regolazione del precarico delle molle del sistema di avviamento che non preveda il fermo macchina, come invece è necessario nella versione progettata;
- La verifica dell'antiribaltamento della macchina;



**INDICE**

<b>PREMESSA</b>	<b>3</b>
<b>1. LE FONTI ENERGETICHE</b>	<b>7</b>
1.1 Introduzione	7
1.2 Le fonti non rinnovabili	10
1.2.1 Il Carbone	10
1.2.2 Il Petrolio	15
1.2.3 Il gas naturale o gas metano	16
1.2.4 L'energia nucleare	19
1.3 Fonti rinnovabili	21
1.3.1 L'energia idroelettrica	26
1.3.2 L'energia solare	29
1.3.3 L'energia geotermica	33
1.3.4 L'energia del mare	37
1.3.5 L'energia da biomasse	38
<b>2. L'ENERGIA EOLICA</b>	<b>43</b>
2.1 Introduzione	43
2.1.1 La storia	44
2.1.2 Il potenziale dell'energia eolica	46
2.1.3 Funzionamento e tipologie costruttive	47
2.1.4 Costi	53
2.1.5 Diffusione	53
2.2 Valutazioni	56
2.2.1 Caratteristiche positive	56
2.2.2 Caratteristiche negative	56
2.3 Turbine ad asse orizzontale	58
2.4 Turbine ad asse verticale	63
2.4.1 Turbina Savonius	65
2.4.2 Il panemone	66
2.4.3 Turbina Darrieus	68
2.4.4 Turbine verticali e orizzontali a confronto	72
2.5 Limite di Betz	73

<b>3. PROGETTAZIONE DEI COMPONENTI</b>	<b>81</b>
3.1 Valutazioni delle soluzioni costruttive precedenti	81
3.2 Calcolo della potenza erogata	84
3.3 Il profilo alare e la scelta del tipo di rotore	93
3.3.1 Considerazioni generali sui profili alari	93
3.3.2 Scelta del profilo alare	96
3.3.3 La forma del rotore	102
3.4 Il sistema di avviamento	107
3.4.1 Il dimensionamento delle molle	114
3.5 Le guide	120
3.5.1 Le guide mobili e il sistema di regolazione del precarico	120
3.5.2 Le guide fisse	124
3.6 Perni dei profili alari	127
3.7 L'anima della pala portante	131
3.8 Scelta dei cuscinetti	136
3.9 Collegamenti bullonati dei carrelli	145
3.10 Il generatori di corrente	146
3.11 Rotaia e carrelli	154
<b>4. IL MONTAGGIO</b>	<b>161</b>
4.1 Montaggio dei singoli componenti	161
4.2 Montaggio del complessivo	165
<b>5. STUDIO AGLI ELEMENTI FINITI</b>	<b>169</b>
5.1 Esecuzione dello studio	169
<b>6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</b>	<b>175</b>

## ***BIBLIOGRAFIA***

- Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek “Fundamental of machine component design;
- Yunus A. Çengel, John M.Cimbala, “Meccanica dei fluidi” edizione italiana a cura di Giuseppe Cozzo e Cinzia Santoro, McGraw-Hill;
- Desiré Le Gouriers “ Energia eolica, teoria, progetto e calcolo pratico degli impianti “ Ed. Masson;
- “Self-starting capability of a Darrieus turbine”, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, Volume 221, Number 1 / 2007, Sage Publications;
- A. Caffarelli, G. de Simone, M. Stizza, A. d’Amato, V. Vergelli: “Sistemi eolici: progettazione e valutazione economica. Impianti micro, mini, multimegawatt”, Maggioli Editore;
- Robert E. Sheldahl and Paul C. Klimas, “Aerodynamic Characteristics of Seven Airfoil Sections Through 180 Degrees Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines”, SAND80-2114, March 1981, Sandia National Laboratories;
- Gopal B. Reddy, Adviser James H. Strickland, “The Darrieus Wind Turbine: An Analytical Performance Study”, Dec. 1975 Texas Tech University, Lubbock, TX 79409, USA;

### **Software:**

Solid works 2011

Wolfram Mathematica 7

Microsoft Excel 2010

## *BIBLIOGRAFIA*

# ***RINGRAZIAMENTI***

Ebbene sì, dopo quasi sette anni di profondo impegno e di sacrifici, sembrerebbe che sia arrivato alla fine, come direbbe un mio caro amico, “vedo la luce in fondo al tunnel”...

Le persone che dovrei ringraziare per avermi sostenuto e aiutato nel mio percorso di studi sono veramente tante, e quindi è impossibile citarli tutti.

Sicuramente se sono arrivato fino qui il merito è della mia famiglia, che mi ha sempre sostenuto e sopportato, sì, sopportato... perché nei momenti di tensione mi rendo conto di essere stato a volte veramente molto opprimente.

Mi avete sempre dato coraggio anche nei momenti più bui quando la motivazione era a livelli sotteranei, dicendomi:” coraggio, non ti avvilito ”.

Grazie Ines, Irene, Gabriele, Arnaldo e Devis!

Come posso non citare i miei compagni, sia quelli che mi hanno accompagnato sin dall’Itis, sia quelli che ho conosciuto nella trincea di Via Fontanelle.

Grazie Brighi, Nasolini, Olivi, Pirini, Piccinini, Mingozi, Cortesi, Masini, Lanzoni e Sig. Fabbri!

E’ doveroso porgere un sentito ringraziamento a chi ha reso possibile la realizzazione della mia tesi ovvero il Prof. Ing. Luca Piancastelli, per la sua professionalità, disponibilità, gentilezza, per lo spirito di allegria con cui mi ha aiutato in questa esperienza e per la grande umanità con cui non ha fatto pesare tutta la sua competenza. È grazie a lui che sono riuscito a terminare questo lavoro in tempi ragionevoli e in maniera serena.

Ancora un enorme grazie a tutti gli amici, ed in particolare ai “sanzenesi“ che mi hanno sostenuto, capito e soprattutto hanno la pazienza di sopportarmi tutti i santi giorni.

Per concludere, ringrazio tutti coloro che, in un modo o nell’altro, hanno creduto in me e mi hanno accompagnato in questo viaggio fino al conseguimento di questo importante traguardo.



## *BIBLIOGRAFIA*