

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA
IN INGEGNERIA MECCANICA
Sede di Forlì

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In

DISEGNO TECNICO INDUSTRIALE

STUDIO PROGETTUALE DI UN AEROGENERATORE
AD ASSE VERTICALE
PRIVO DI FONDAZIONE

CANDIDATO
Alessandro Agostini

RELATORE
Chiar.mo Prof. Ing. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2011/12
Sessione III

PREMESSA

L'obiettivo di questa tesi è stato quello di progettare e disegnare con l'ausilio del programma CAD “SolidWorks 2012” un aerogeneratore ad asse verticale che si distinguesse dalle altre tipologie di aerogeneratori per alcune caratteristiche particolari, prima su tutte l'utilizzo di vele come sistema di propulsione della turbina eolica.

Inoltre nella realizzazione del progetto sono state seguite una serie di specifiche quali: la semplicità di montaggio e di trasporto dei componenti, dovuta al fatto che l'aerogeneratore è stato pensato per essere posizionato in zone montuose difficilmente raggiungibili da mezzi pesanti e, come si evince dal titolo della tesi, l'assenza del basamento di sostegno della torre eolica.

Per soddisfare le specifiche sopracitate si è pensato di ridurre l'ingombro dei singoli componenti a non più di 3-3.5 metri per poter essere trasportati su autoveicoli come pick up o furgoncini 4x4 in grado di raggiungere anche zone impervie e si è cercato di utilizzare collegamenti semplici, per lo più flange bullonate, per agevolare il montaggio sul posto.

Per quel che riguarda il basamento si è pensato di evitarlo perché è stato riscontrato come la sua realizzazione comporti un elevato aumento dei costi d'installazione dovuti alla criticità delle zone in cui si andrà a costruire spesso prive di vie di accesso e, non meno importante, alle sue ingenti dimensioni che comportano un eccessivo uso di materiale, in questo caso cemento armato, e di mezzi [Fig. 1].

Senza trascurare gli ulteriori costi di smantellamento dell'impianto che ha una durata limitata circa ai 25 anni e l'impatto ambientale che si avrebbe nel caso in cui il basamento non fosse totalmente rimosso e i materiali correttamente smaltiti.



[Fig. 1] - *Scavo per il basamento di una torre eolica.*

Infine si è cercato di limitare il peso della struttura senza alterarne la resistenza per agevolare il trasporto e il montaggio ma senza dimenticare che la turbina sarebbe stata soggetta a forti venti.

L'alluminio, leggero ma resistente, è il materiale che meglio si prestava allo scopo quindi anche il più utilizzato nella realizzazione dei vari componenti.

Per quel che riguarda gli organi di collegamento quali bulloni, viti, perni etc. non si poteva prescindere dall'utilizzo dell'acciaio considerate le sue ottime caratteristiche di resistenza, quello impiegato è stato del tipo semplice al carbonio e inossidabile cromato.

L'EOLICO

Tutti gli aerogeneratori sfruttano l'energia eolica che è l'energia che si ottiene dal vento e che viene trasmessa sotto forma cinetica dalle correnti d'aria, convertita ed utilizzata in altre energie come l'elettrica o la meccanica.

Oggi viene per lo più convertita in energia elettrica tramite una centrale eolica, mentre in passato l'energia del vento veniva utilizzata sul posto come energia motrice per applicazioni industriali e pre-industriali come, ad esempio, nei mulini a vento.

L'elettricità viene prodotta per mezzo di un aerogeneratore accoppiato a una turbina che solitamente viene posta su un asse e messa in rotazione da pale; per assicurare un rendimento ottimale le turbine eoliche vengono installate di preferenza in zone aperte o su rilievi collinari o montuosi, e comunque in luoghi ove siano garantite adeguate condizioni di vento. Nella maggior parte dei casi gli aerogeneratori vengono collocati in gruppo dando vita ai cosiddetti “parchi eolici” [Fig. 2], per poter sfruttare vaste aree dalle condizioni particolarmente favorevoli e costituire nuclei apprezzabili di produzione elettrica da collegare alla rete di distribuzione.



[Fig. 2] - *Parco eolico on-shore.*

Le aree di interesse per la generazione di energia elettrica sono quelle in cui la velocità media annua del vento è superiore ai 4 m/s quindi ampi territori non sono idonei per essere sfruttati, ciò non toglie che rispetto all'energia derivata da combustibili fossili, l'energia eolica presenta ancora vantaggi rilevanti: è rinnovabile, abbondante e soprattutto non produce gas serra.

Per quel che riguarda le macchine eoliche, queste si suddividono in quattro categorie: secondo l'asse di rotazione (orizzontale o verticale) e la velocità: lenta, allora 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 essere dieci volte superiore a quella del vento.

Le macchine destinate alla produzione di elettricità sono le macchine rapide che offrono un buon rendimento circa del 70% e hanno due o tre pale a forma di ala di aeroplano per assicurare la portanza che genererà la coppia di rotazione.

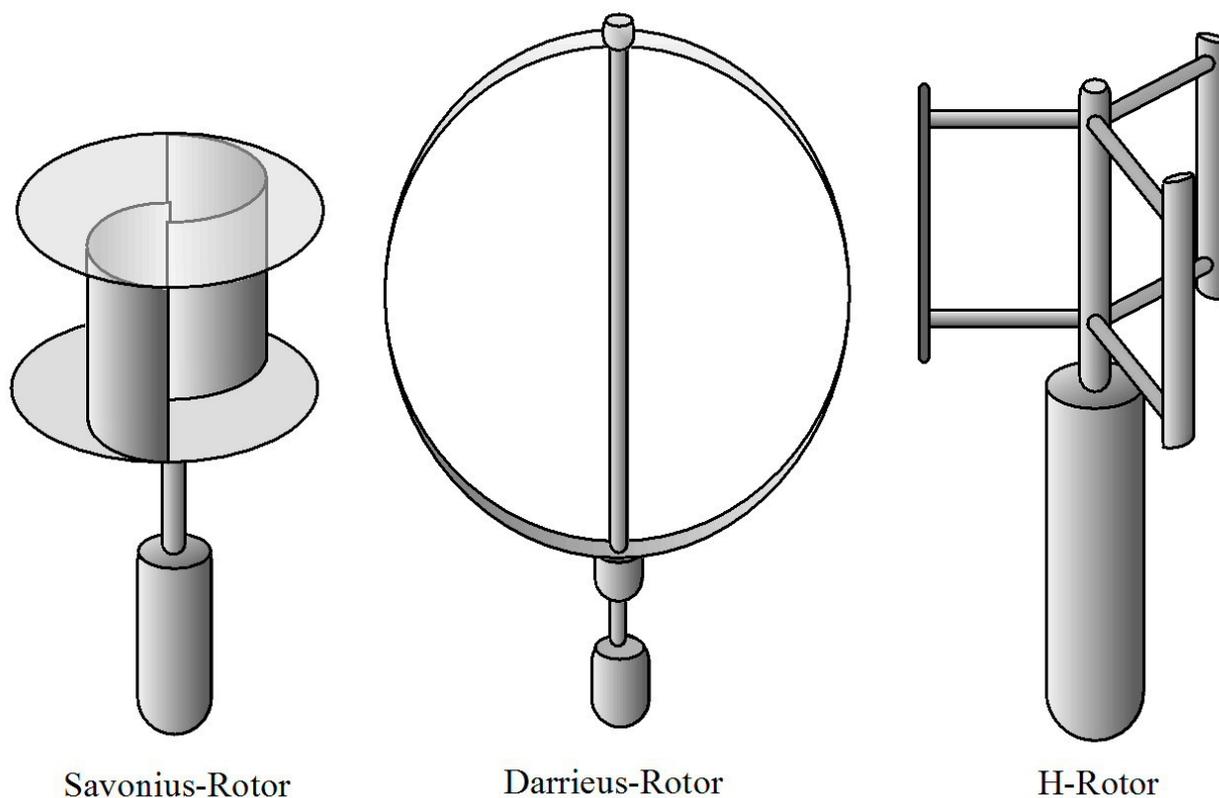
Negli aerogeneratori ad asse orizzontale la direzione del vento è parallela all'asse del rotore mentre in quelli ad asse verticale l'asse del rotore è perpendicolare al terreno e alla direzione del vento.

I primi sono formati da una torre in acciaio di altezze tra i 60 e i 100 metri sulla cui sommità si trova un involucro (gondola) che contiene un generatore elettrico azionato da un rotore a pale lunghe tra i 20 e i 60 metri (solitamente 3, quasi mai 2, raramente 1).

Esso genera una potenza molto variabile, che può andare da pochi KW fino a 5-6 MW, in funzione della ventosità del luogo e del tempo.

L' aerogeneratore ad asse di rotazione verticale è contraddistinto 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 (una sola turbina soddisfa il fabbisogno elettrico mediamente di circa 1000 case); si distingue principalmente in tre categorie: turbine Savonius, turbine Darrieus e panemone [Fig. 3].



[Fig. 3] - *Turbina Savonius e turbine Darrieus di tipo “eggbeater” e ad H.*

Le turbine Savonius funzionano a resistenza e sono formate da due semi-cilindri fissati ad un albero centrale e montati in opposizione: il vento andando ad impattare su un semi-cilindro mette in rotazione tutto l'albero, in questo modo mentre un semi-cilindro vede lentamente ridurre la vena fluida che lo colpisce, quello opposto vede incrementare tale vena; il processo si ripete dando luogo ad una rotazione continua.

Le turbine Darrieus si basano sul principio della portanza e sono in grado di produrre potenze elevate ma hanno il difetto di dover essere avviate; sono di tre tipologie che si differenziano tra loro solo per la forma delle pale: ad H, elicoidali e le “eggbeater”.

Il panemone, come la Savonius, funziona a 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.

I generatori ad asse verticale, come quelli ad asse orizzontale, richiedono una velocità minima di 3-5 m/s ed erogano la potenza di progetto ad una velocità del vento di 12-14 m/s.

Gli impianti eolici possono essere di vari tipi:

- eolico on-shore, l'eolico più diffuso descritto in precedenza
- eolico off-shore, con impianti installati ad alcune miglia dalla costa di mari o laghi, per meglio utilizzare la forte esposizione alle correnti di queste zone
- minieolico e microeolico, con impianti di piccola taglia, adatti ad uso domestico o per integrare il consumo elettrico di piccole attività economiche
- eolico d'alta quota, che prevede lo sfruttamento dei venti d'alta quota.

Oltre a considerazioni sull'impatto ambientale che risulta decisamente inferiore rispetto a quello di altre tipologie di impianti, grazie al fatto che si impiega una fonte energetica rinnovabile oltre che sostenibile e che, ad esempio, le strutture di una centrale eolica occupano solo l'1% del totale della superficie interessata, bisogna considerare anche i costi. Nella fattispecie: 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, i costi di mantenimento e smantellamento sono relativamente bassi e molti componenti sono riciclabili e riutilizzabili.

Il principale aspetto negativo degli impianti eolici è dato dal problema dell'intermittenza o variabilità aleatoria della fonte di energia, in questo caso il vento, il quale comporta che il settore eolico non possa sostituire completamente le fonti tradizionali quali i combustibili fossili o l'energia idroelettrica per i quali la potenza erogata è invece 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.

Non ultimo si è scelto di progettare un aerogeneratore ad asse verticale perché offre alcuni ulteriori vantaggi rispetto alle altre tipologie uno dei quali è il fatto di presentare il generatore in basso, vicino al terreno, facilitando le operazioni di montaggio, di manutenzione e di messa in sicurezza vista la probabilità di essere colpito da un fulmine che è causa frequente di guasti; in questo caso la probabilità si riduce.

Altro punto a favore dell'asse di rotazione verticale è la bassa produzione di rumore e la maggior semplicità produttiva e costruttiva delle pale che comportano minori costi iniziali. La principale controindicazione di una turbina ad asse verticale è quella di avere una coppia non costante, variabile da valori positivi a negativi, dovuta alle pale sottovento che ruotano per mezzo giro all'interno di una scia turbolenta prodotta dalle pale precedenti unita alla continua variazione dell'angolo di incidenza durante la rotazione.

Questo fatto comporta di non poter trascurare la fatica e di preferire macchine non troppo caricate che devono comunque essere progettate per una vita finita.

Per quanto riguarda il calcolo della potenza estraibile dalla corrente ventosa e che possa essere convertita in potenza utile questa, qualora fosse possibile arrestare completamente la vena fluida, risulta dalla formula seguente:

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

dove Q è la portata in massa del fluido data dal prodotto dell'area della superficie intercettata per la densità e la velocità del fluido stesso.

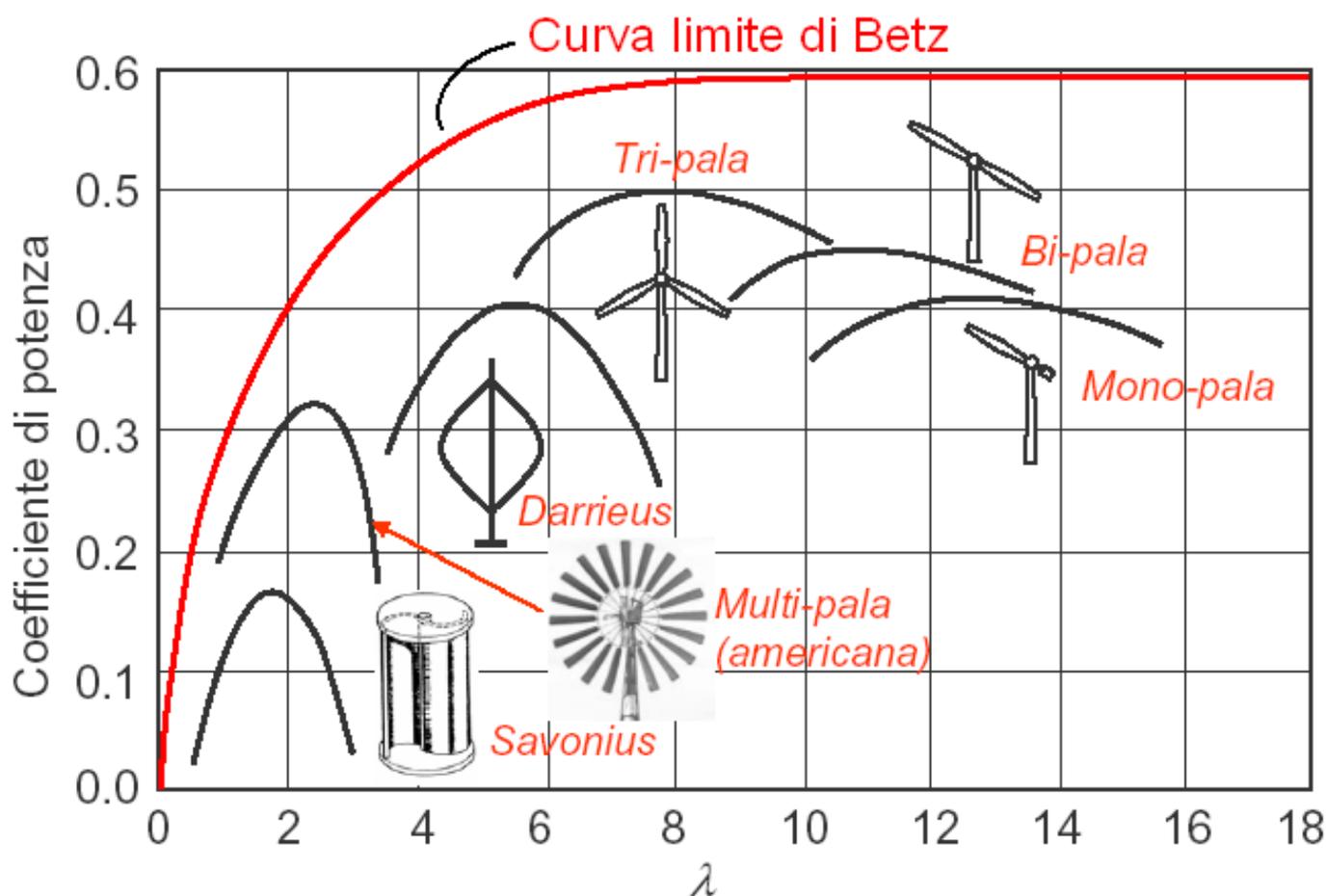
Si consideri che a parità di sezione di captazione A, la densità e la velocità e quindi la potenza a disposizione P, risultano variabili con la quota; lo stesso si può dire del vento che cresce con l'aumentare della quota.

In realtà la densità dell'aria è inversamente proporzionale all'altezza ma nonostante ciò la potenza teoricamente ottenibile da una turbina eolica aumenta con l'altezza perché il contributo della velocità cresce più velocemente di quanto decresce quello della densità, ciò spiega il frequente ricorso a turbine sempre più alte.

Finora si è parlato di potenza teorica ma la potenza effettivamente captabile da un rotore eolico, anche considerando perdite nulle, risulta minore in quanto non è possibile arrestare completamente la corrente ventosa, quindi diciamo che la potenza è limitata superiormente dal “limite di Betz” che è approssimativamente pari al 60% senza considerare perdite meccaniche e fluidodinamiche che possiamo introdurre nella formula precedente moltiplicando per il coefficiente di potenza C_p .

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 nella [Fig. 4] dove viene riportato il coefficiente di potenza in funzione del coefficiente di velocità per varie tipologie di rotori eolici, si può notare anche che nel caso reale il coefficiente di potenza non è costante bensì variabile in dipendenza dalla velocità del vento.

Il coefficiente di velocità periferica λ 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. 4] - Andamento del coefficiente di potenza in funzione del coefficiente di velocità periferica.

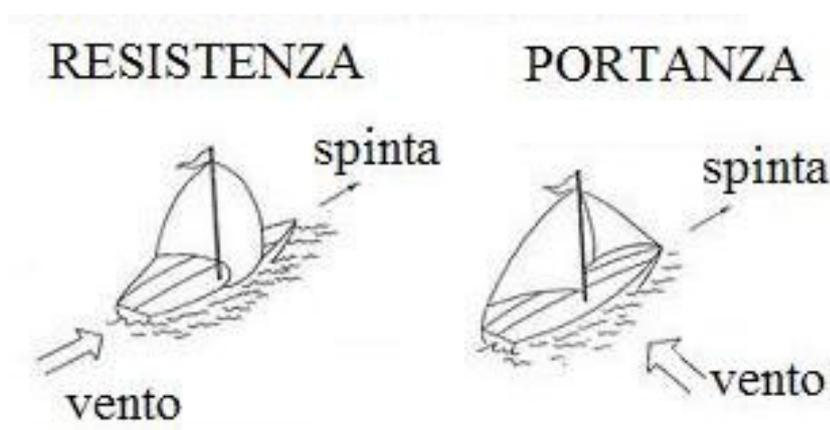
IL PROGETTO

INTRODUZIONE

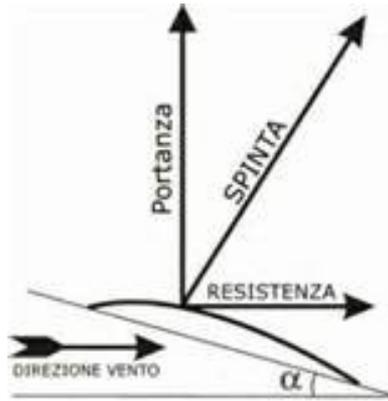
La caratteristica principale dell'aerogeneratore da me progettato è quella di utilizzare le vele per catturare l'energia del vento e trasformarla, nel nostro caso, prima in energia meccanica necessaria a mettere in rotazione la turbina, poi in energia elettrica; non a caso la propulsione per mezzo di vele fu la prima forma di sfruttamento dell'energia eolica (barche, navi) fin dalla preistoria.

L'idea quindi è stata quella di disegnare un aerogeneratore dotato di un albero centrale per sostenere un adeguato numero di vele, ognuna con un proprio boma sul modello di una barca a vela classica, quest'ultimo infine collegato all'albero in modo da trasmettergli una rotazione che mantenga in moto tutta la turbina.

La conformazione delle vele unita al loro posizionamento fa sì che la turbina lavori sia per portanza che per resistenza ma prevale la prima poiché, proprio come accade in campo nautico dove prevalgono le zone in cui la navigazione avviene per portanza e non per resistenza [Fig. 5], anche nel settore eolico è vantaggioso prediligere la forza di portanza dato che nella maggior parte delle configurazioni in cui una pala, nel nostro caso la vela, si trova a lavorare, tale forza risulta di maggiore entità rispetto alla resistenza [Fig. 6].



[Fig. 5] - Esempi di navigazione per portanza e resistenza.



[Fig. 6] - *Schema delle forze agenti sulla vela.*

Altra peculiarità dell'aerogeneratore è l'assenza del basamento in cemento armato; a ciò si è ovviato riprendendo una soluzione vantaggiosa oltre che originale proposta dall'Ingegnere Bonavita per la realizzazione di una turbina ad asse verticale, ovvero l'utilizzo di una rotaia circolare a pavimento che sostiene i carrelli, che a loro volta sostengono la struttura, e ne migliora la centratura radiale.

DESCRIZIONE DEI COMPONENTI

L'ALBERO

Nella descrizione dei componenti partiamo dall'albero in quanto è forse la parte più importante dell'aerogeneratore perché sostiene le vele, ne assorbe l'energia sotto forma di rotazione e la trasmette ai carrelli che contengono i generatori, è inoltre la parte più sollecitata.

Il problema principale è stato trovare una soluzione al fatto di non poter disporre dell'albero intero lungo 10.5 metri, poiché il suo trasporto avrebbe richiesto l'uso di un autoarticolato incapace di raggiungere zone montuose su strade sterrate e dalla carreggiata limitata.

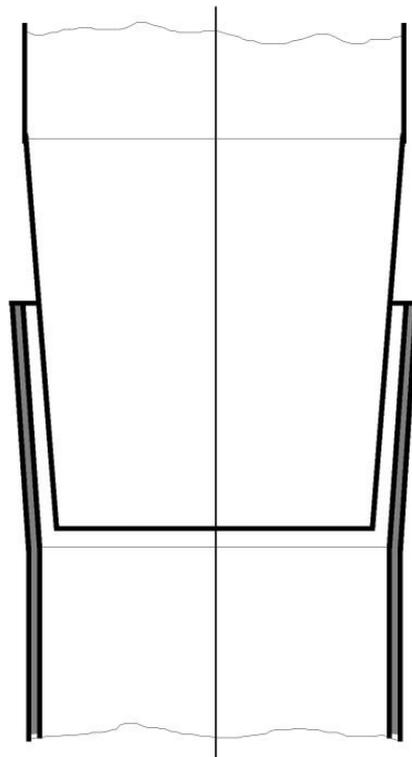
Si è presa in considerazione anche la possibilità del trasporto aereo per mezzo di un elicottero ma è stata scartata in quanto poco economica infatti altra prerogativa del progetto è stata quella di contenere i costi di realizzazione e di manutenzione.

Per risolvere questo inconveniente una soluzione era la fabbricazione dell'albero in tronconi separati, tre per la precisione, da collegare mediante incollaggio di collari interni o esterni, spesso integrato con una rivettatura ma risultava comunque molto problematica la realizzazione di giunzioni di buona qualità e con spessore uniforme di adesivo; i fori dei rivetti potevano inoltre pregiudicare la resistenza locale.

L'aggiunta dei collari comportava infine, un incremento di peso non trascurabile.

Con l'obiettivo di superare le limitazioni appena discusse mantenendo comunque i vantaggi legati alla realizzazione di un albero in più parti, si è optato per una soluzione alternativa che prevede giunzioni tronco-coniche incollate, senza la necessità di collari supplementari o rivettature.

Questa risulta molto efficace pur nella sua semplicità: si è pensato di realizzare per ciascuno dei tronconi un'estremità tronco-conica a bassa conicità, maschio da un lato e femmina dall'altro, secondo lo schema riportato in [Fig. 7].



[Fig. 7] - *Rappresentazione schematica della zona di giunzione dei tronconi di albero.*

La realizzazione dell'albero prevede la deposizione di adesivo strutturale sulle zone di collegamento all'estremità dei tronconi, l'assemblaggio del numero di tronconi necessario per raggiungere la lunghezza desiderata, l'applicazione di un carico di compressione parallelo all'asse longitudinale dell'albero stesso e la realizzazione del ciclo di cura dell'adesivo mediante termocoperte oppure, più semplicemente ma con minori prestazioni dell'adesivo, a temperatura ambiente.

Il carico di compressione si applica mediante i tiranti esterni che assicurano anche una certa stabilità nei confronti degli sforzi perpendicolari all'asse dell'albero.

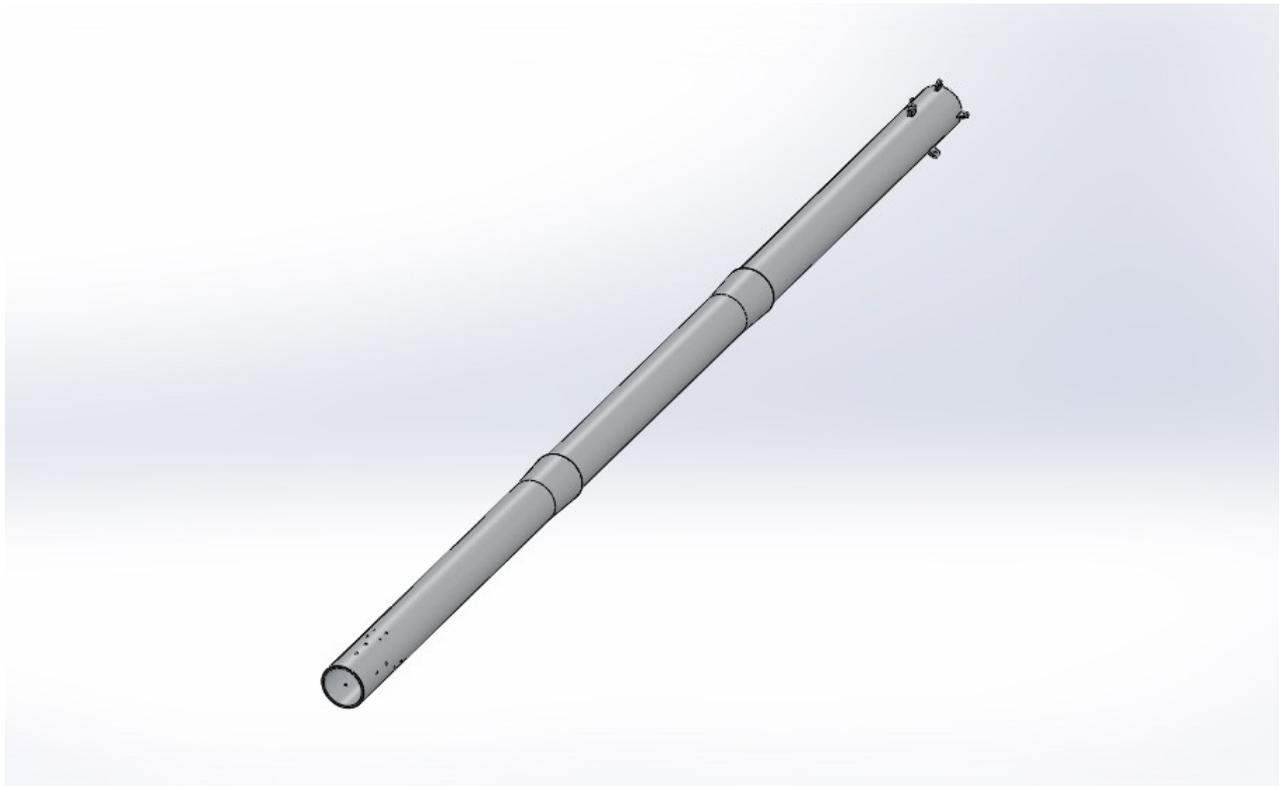
Per effetto della conicità delle estremità dei tronconi, il carico di compressione consente di realizzare un ottimo allineamento dell'albero completo facendo uso di semplici cavalletti per il premontaggio.

Rispetto alla soluzione con collari interni o esterni, la conicità delle superfici d'accoppiamento consente inoltre la realizzazione di giunzioni di qualità notevolmente superiore: induce infatti una pressione uniforme e facilmente controllabile sulle superfici di incollaggio migliorando il processo di cura dell'adesivo e garantisce spessori di adesivo uniformi su tutta la superficie della giunzione.

Ma il vantaggio più importante della soluzione proposta che ha fatto sì che la scegliessi, è la facilità di trasporto: grazie al semplice sistema di collegamento è infatti possibile trasportare i soli tronconi e realizzare l'assemblaggio dell'albero direttamente sul luogo dell'installazione, abbattendo drasticamente i costi di trasporto, elevatissimi nel caso di un albero monolitico di grandi dimensioni.

Per quel che riguarda l'adesivo, si tratta di una resina epossidica da laminazione manuale, addensata con microsferi sulla quale va effettuato un ciclo di cura di 12 ore a temperatura ambiente e una post-cura, mediante termocoperte, per 10 ore a circa 60° C.

In [Fig. 8] si può vedere l'albero nella sua interezza, composto da tre tronconi lunghi ciascuno 3.5 metri, realizzati in lega leggera di alluminio e, nella parte superiore, la presenza degli elementi per l'attacco dei tiranti di sostegno e per l'attacco delle vele.



[Fig. 8] - *Complessivo dell'albero di sostegno.*

I tiranti usati per irrobustire la struttura sono di tipo nautico, scelti da catalogo con una fune spiroidale avente un diametro di 14 mm e in grado di resistere a carichi di 180 KN. Nella [Fig. 9a-9b] si può notare come le estremità dei tiranti siano diverse: la prima mostra il particolare dell'attacco all'albero mentre nella seconda si osserva l'utilizzo di un gancio.



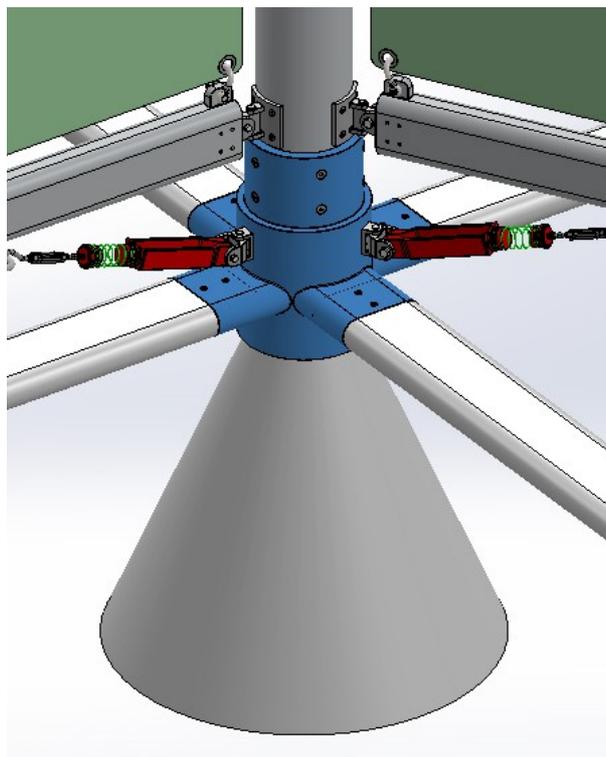
[Fig. 9a-9b] - *Particolari dei tiranti.*

L'utilizzo di una copiglia unito al fatto che il gancio è regolabile in lunghezza, sono piccoli accorgimenti che facilitano le regolazioni oltre che le operazioni di montaggio e di smontaggio per manutenzione.

GLI ORGANI DI TRASMISSIONE DEL MOTO

L'albero è collegato al resto della struttura per mezzo di un giunto, vi si incastra senza lasciare giochi e si appoggia su una rientranza, e per poter trasmettere la rotazione i due componenti sono fissati l'uno all'altro con delle viti.

La forma del giunto è studiata per poter trasmettere il moto rotatorio ai carrelli tramite bracci di collegamento e nello stesso tempo scaricare a terra il peso dell'albero utilizzando un sostegno; in questo modo i bracci disposti orizzontalmente non subiscono pericolosi sforzi di taglio che ne comprometterebbero l'integrità [Fig. 10].



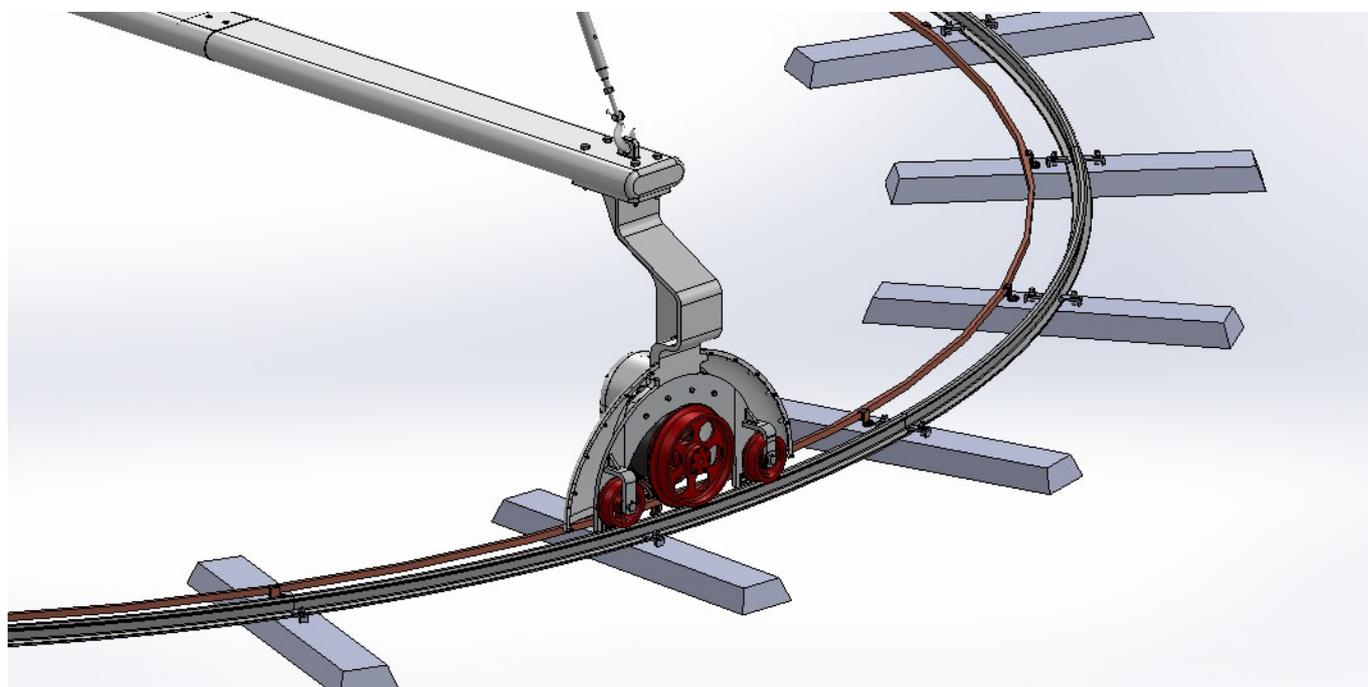
[Fig. 10] - *Particolare dell'accoppiamento albero-giunto-sostegno conico (il giunto è evidenziato).*

Per fare ciò fra il sostegno e il giunto è inserito un cuscinetto assiale reggispinta con un diametro interno di 200 mm ed esterno di 400 mm che risponde alle esigenze infatti scarica il peso sul sostegno che è fisso e di forma conica per distribuire meglio i pesi, ma lascia la libertà di ruotare al resto della struttura sovrastante.

Il cuscinetto è stato scelto da catalogo per poter sostenere il peso dell'albero sovrastante che è di circa 615 kg e, come dice il nome, è adatto a sostenere carichi assiali monodirezionali ma non ad operare ad elevati regimi di rotazione, cosa che comunque non si verifica nel nostro caso.

Come si nota nella figura precedente i bracci di collegamento sono quattro, sono disposti a croce per dare più stabilità alla turbina e ognuno di essi è formato da due componenti di 2.5 metri; sono uniti fra loro e al giunto ad incastro e sono fissati con dei bulloni per evitare che possano scorrere lungo il proprio asse.

All'altra estremità del braccio è fissato il carrello che scorre sulla rotaia e produce elettricità per mezzo del generatore contenuto al suo interno [Fig. 11].



[Fig. 11] - *interno di uno dei carrelli e rotaia.*

Come si è detto in precedenza 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; ogni carrello ad esempio è collegato alla struttura sovrastante mediante quattro bulloni del tipo M14x2.

IL GENERATORE DI CORRENTE

Parliamo ora del generatore di corrente che è il cuore della turbina eolica ed è una macchina in cui la potenza in ingresso è di tipo meccanico mentre 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 è la parte fissa del motore, ha il compito di sostenere la macchina e 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.

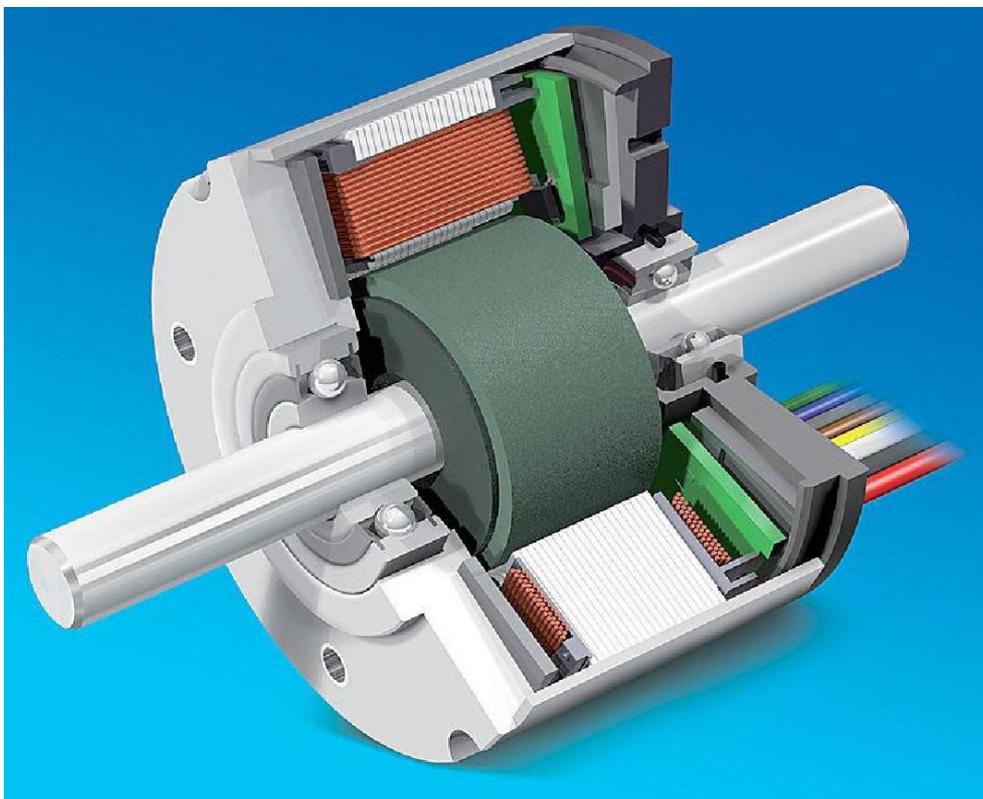
In genere i motori elettrici si suddividono in due grandi famiglie: motori in corrente continua e motori a corrente alternata.

Si è optato per quelli a corrente continua perché hanno un comportamento reversibile ossia può creare energia funzionando da dinamo ma, quando serve l'azione frenante può anche agire da freno quindi è ideale per il caso in oggetto; il motore in corrente continua si suddivide a sua volta in: motore in corrente continua a spazzole e motore brushless [Fig. 12]. Si è scelto quest'ultimo perché 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 minor resistenza meccanica, elimina la possibilità che si formino scintille al crescere della velocità di rotazione e riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica.

I vantaggi del motore brushless sono: l'assenza di spazzole che elimina la principale fonte di rumore elettromagnetico e ne aumenta la vita utile dato che le spazzole sono il punto debole del motore a corrente continua, l'ingombro limitato e il minor sviluppo di calore unito all'assenza di scintille e infine, il fatto che 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; lo svantaggio principale di questo tipo di motori sta nel costo maggiore.

I generatori nel nostro caso sono quattro e poiché dovranno ruotare insieme alla struttura, dovranno anche essere caratterizzati da un basso rapporto peso-potenza giustificando così la scelta fatta.



[Fig. 12] - *Spaccato di un motore brushless.*

In particolare il motore è il “Power Drive 40” della ditta “Yuneecc” che è di tipo aeronautico ed è controllato internamente da sensori che garantiscono ogni tipo di controllo, garantendo quindi ottime prestazioni e grande affidabilità.

Produce 40 KW a 2400 rpm, ha un peso ridotto di 19 kg e un diametro massimo del rotore di soli 200 mm.

Per la trasmissione dell'energia elettrica, non potendo contare su un unico generatore centrale come nelle soluzioni classiche, si ricorre ad una corona coassiale con la rotaia a cui viene ceduta l'energia elettrica da appositi contatti striscianti collegati ai generatori. La forma particolare dei contatti striscianti situati all'interno del sistema di conduzione, all'aumentare del regime di rotazione e quindi della forza centrifuga, fa sì che questi vengano spinti verso il conduttore e non allontanati come sarebbe successo se fossero stati posizionati all'esterno [Fig. 13].

LA ROTAIA E I CARRELLI

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, inoltre costituisce un percorso guidato per il rotore della turbina durante la rotazione favorendone il corretto funzionamento.

La rotaia assemblata ha un raggio di 5550 mm ed è costituita da dieci diversi elementi a forma di semplice binario, lunghi circa 3000 mm, uniti fra loro e fissati alle traversine con un tipico sistema ferroviario costituito da componenti di fissaggio e da bulloni M20.

Le traversine sono in cemento, in quanto le uniche disponibili in commercio, per un totale di venti e, opportunamente spaziate tra loro, formano la base d'appoggio della rotaia.

Come si vede in [Fig. 11] il carrello è composto da cinque ruote: due laterali con diametro di 200 mm, una ruota centrale con diametro di 420 mm e due ruote di sostegno posteriori con diametro di 70 mm.

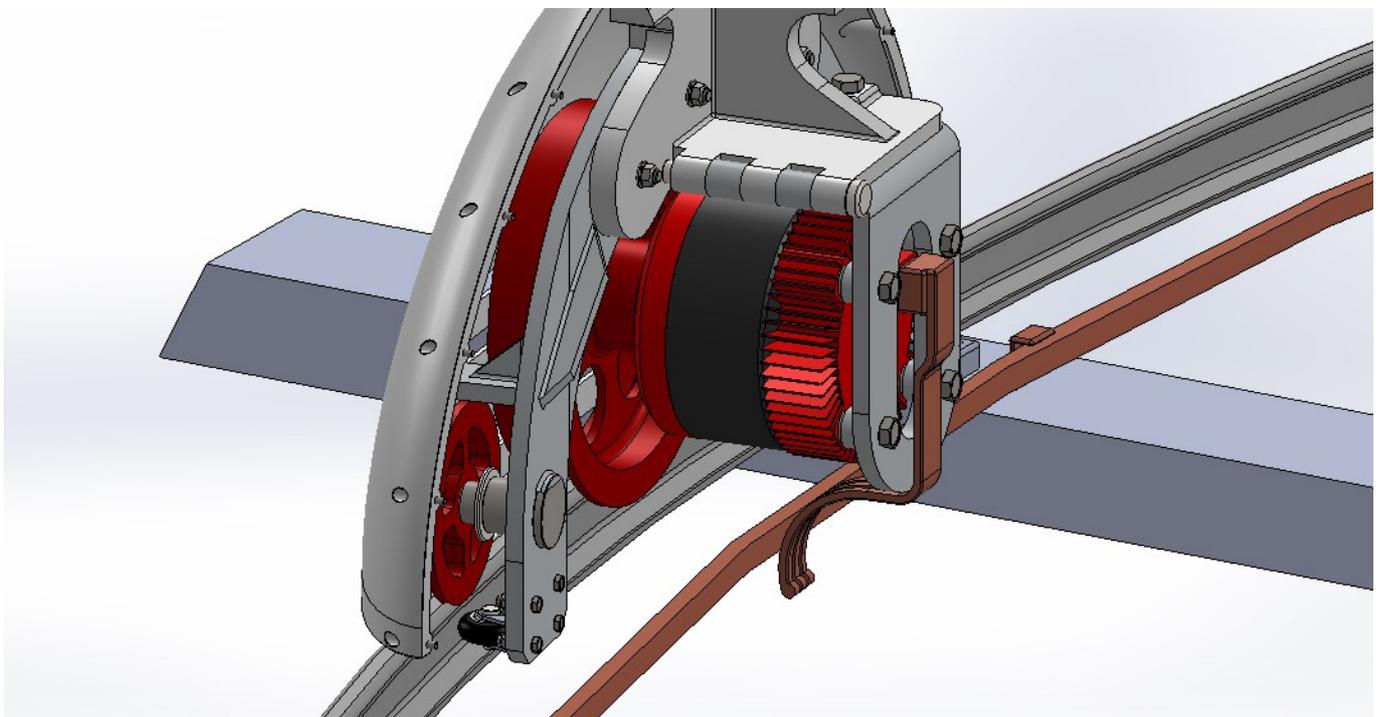
Il carrello è costituito da una grande piastra a forma circolare in cui alloggiavano i perni delle ruote che non è perfettamente piana così da assecondare il raggio di curvatura della rotaia.

In questo modo la ruota centrale che è solidale all'albero del generatore, non è soggetta al carico della struttura che grava sulle ruote laterali, evitando la sollecitazione a flessione rotante allo stesso albero.

Le ruote laterali sono fissate appunto con dei perni in acciaio inossidabile, opportunamente sagomati per tenerle alla quota ottimale rispetto al binario e sono bloccati con delle semplici copiglie a scatto.

Le ruote posteriori, oltre a migliorare il centraggio del rotore, svolgono il fondamentale compito di impedire il ribaltamento della turbina, infatti ruotano tangenti al profilo obliquo a lato dei binari quindi, in caso di accenno al ribaltamento, si impuntano contro tale superficie bloccando il movimento indesiderato [Fig. 13].

Infine si è adottato un carter per ricoprire tutto il sistema descritto sopra e proteggerlo dagli agenti atmosferici, esso è dotato di due coperchi su entrambi i lati, per favorire le operazioni di manutenzione.



[Fig. 13] - *Particolare dell'accoppiamento carrello-rotoria (si notano le ruote posteriori, il motore brushless ed i contatti striscianti ad esso collegati).*

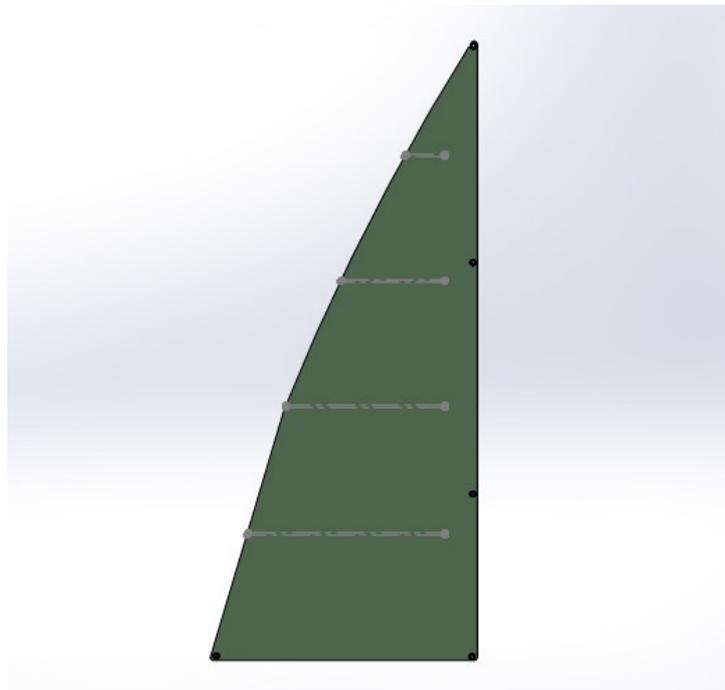
Come si può notare nella figura precedente il motore è fissato con quattro bulloni ad una piastra che ad una estremità è incernierata, mentre dall'altra presenta una vite con un perno dotato di foro filettato, che consente di regolare la posizione del motore e quindi della ruota a cui è collegato; questa può rendersi necessaria ad esempio, qualora ci sia usura dei componenti accoppiati a rotolamento.

LE VELE

Passiamo ora a descrivere le vele che sono un componente altrettanto importante dell'aerogeneratore poiché catturano l'energia del vento trasferendola all'albero sotto forma di rotazione.

Sono tre sfasate di un angolo di 120° e il loro numero non è casuale perché in questo modo si ottiene l'indipendenza del tempo di avviamento del rotore in funzione della posizione di partenza, cosa che non si avrebbe con un numero minore, e basse sollecitazioni nel complesso.

Le vele sono di tipo nautico, lunghe 8400 mm e larghe 3530 mm ed hanno forma triangolare sul modello di una tipica randa usata sulle imbarcazioni classiche [Fig. 14].



[Fig. 14] - *Profilo della vela (sono evidenziate le tasche in cui alloggiavano le stecche).*

A questo proposito, le vele sono issate sull'albero per mezzo di ganci e occhielli, mentre in basso sono fissate ad un boma la cui funzione è quella di mantenere la vela tesa e di trasmettere il moto all'albero stesso a cui è collegato.

Il materiale scelto per le vele è il nylon che è leggero, non poroso e si allunga un po' più del poliestere che è ormai in disuso anche se tende ad assorbire umidità; in alternativa si può optare per il Dacron o “tessuto composito”, che presenta il vantaggio di avere grande resistenza e durata contro il sole ma per questo motivo è anche un tessuto più pesante e quindi meno adatto alle condizioni di vento leggero.

Si è pensato di dotare ciascuna vela di stecche lunghe, curve ed orizzontali perché mantengono la vela tesa e regolare con vento mentre la mantengono “spiegata” con vento leggero evitando la rientranza su se stesso del lato obliquo detto balumina, inoltre la presenza delle stecche ripartisce la tensione su tutta la vela che potrà conservare più a lungo la forma.

Le stecche alloggiavano in tasche ricavate all'interno delle vele e possono essere tonde o piatte: le prime sono più costose, richiedono una lavorazione più complessa della tasca, ma sopportano meglio il carico di compressione, le seconde sono più aerodinamiche e costano meno.

Sono perlopiù fatte di resina e, quanto curve e rigide dovranno essere, dipenderà dalla vela, infatti possono essere fatte anche in carbonio a favore della rigidità ma con costi eccessivi.

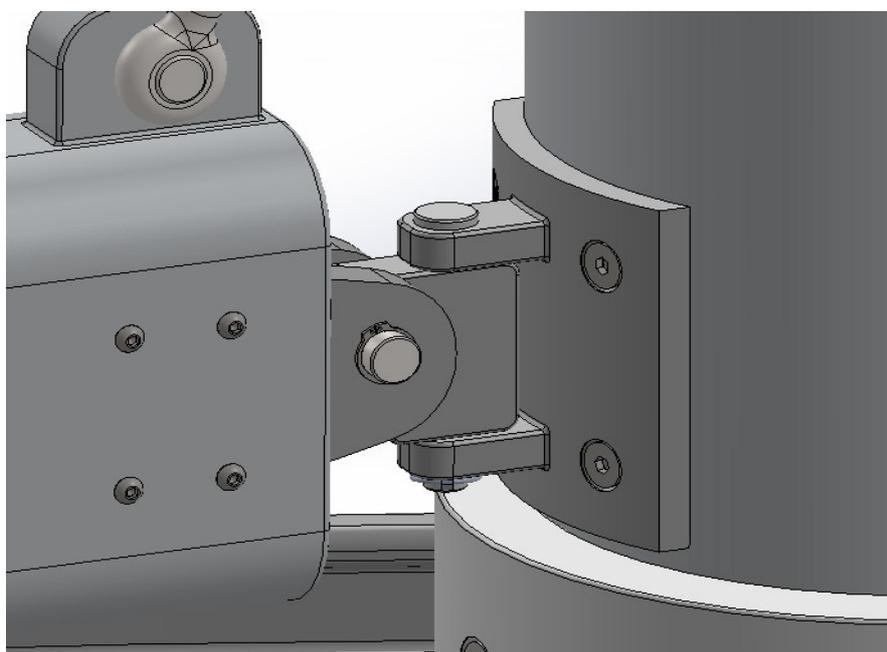
Il fatto di adottare delle stecche oltre che lunghe anche con una certa curvatura nel nostro caso è fondamentale in quanto permette di creare la cosiddetta “pancia” o “grasso” sulla vela e di innescare i fenomeni di portanza che generano la spinta cercata [Fig. 6].

Permette inoltre di ridurre i fenomeni di interferenza che si possono creare nel momento in cui il vento, data la conformazione della turbina, colpisce contemporaneamente due vele; in questo caso infatti, mentre l'aria impatta sulla superficie concava di una delle due vele creando portanza, colpisce anche la superficie convessa dell'altra vela ma non si genera quella spinta contraria che ostacolerebbe il moto rotatorio dell'albero.

IL BOMA E L'AMMORTIZZATORE

Come accennato in precedenza il boma di derivazione navale è lungo 3500 mm e, oltre a mantenere le vele in tensione, ruota solidale con esse in virtù della spinta che genera il vento e trasmette la rotazione all'albero a cui è collegato.

Il collegamento è costruito in modo tale da lasciare completa libertà di movimento ai membri sia sul piano orizzontale che su quello verticale, in modo da potersi orientare come necessario e in gergo nautico prende il nome di trozza [Fig. 15].

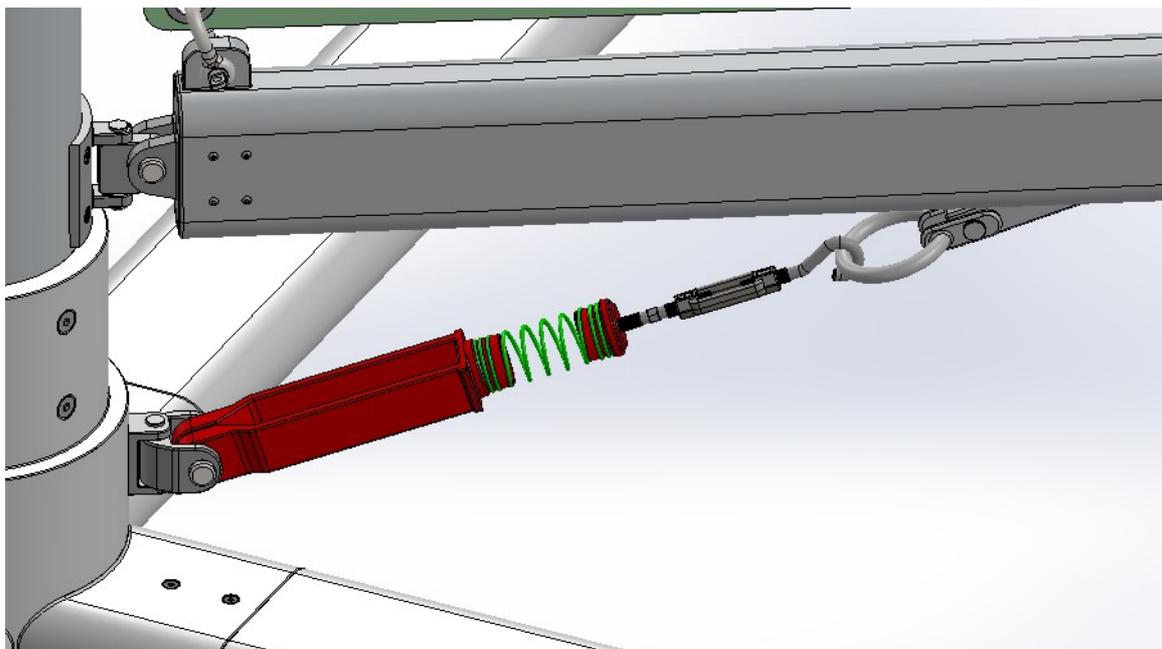


[Fig. 15] - *Particolare del collegamento boma-albero (trozza).*

Si notano in figura i perni in acciaio di forma cilindrica che tengono insieme i vari membri dell'accoppiamento lasciandoli però liberi di ruotare; sono bloccati ad una estremità con testa di spallamento e all'altra con copiglia a scatto e anello elastico di tipo Seeger per rendere più semplici le operazioni di montaggio e smontaggio.

Infine è presente un altro componente che si collega al boma nella sua parte inferiore, si tratta di un ammortizzatore che ha il compito principale di assorbire le eventuali folate di vento eccessive che possono risultare pericolose per la stabilità dell'aerogeneratore, la sua funzione è anche quella di mantenere più regolare la rotazione della turbina.

L'ammortizzatore asseconda i movimenti del boma, quindi è libero di ruotare sia sul piano orizzontale che su quello verticale ed è composto da una molla collegata ad un gancio con occhiello tramite un tenditore in modo tale da poter regolare il precarico della molla stessa. Il componente si collega al resto della struttura in maniera simile al boma come si può vedere in [Fig. 16].



[Fig. 16] - *Ammortizzatore.*

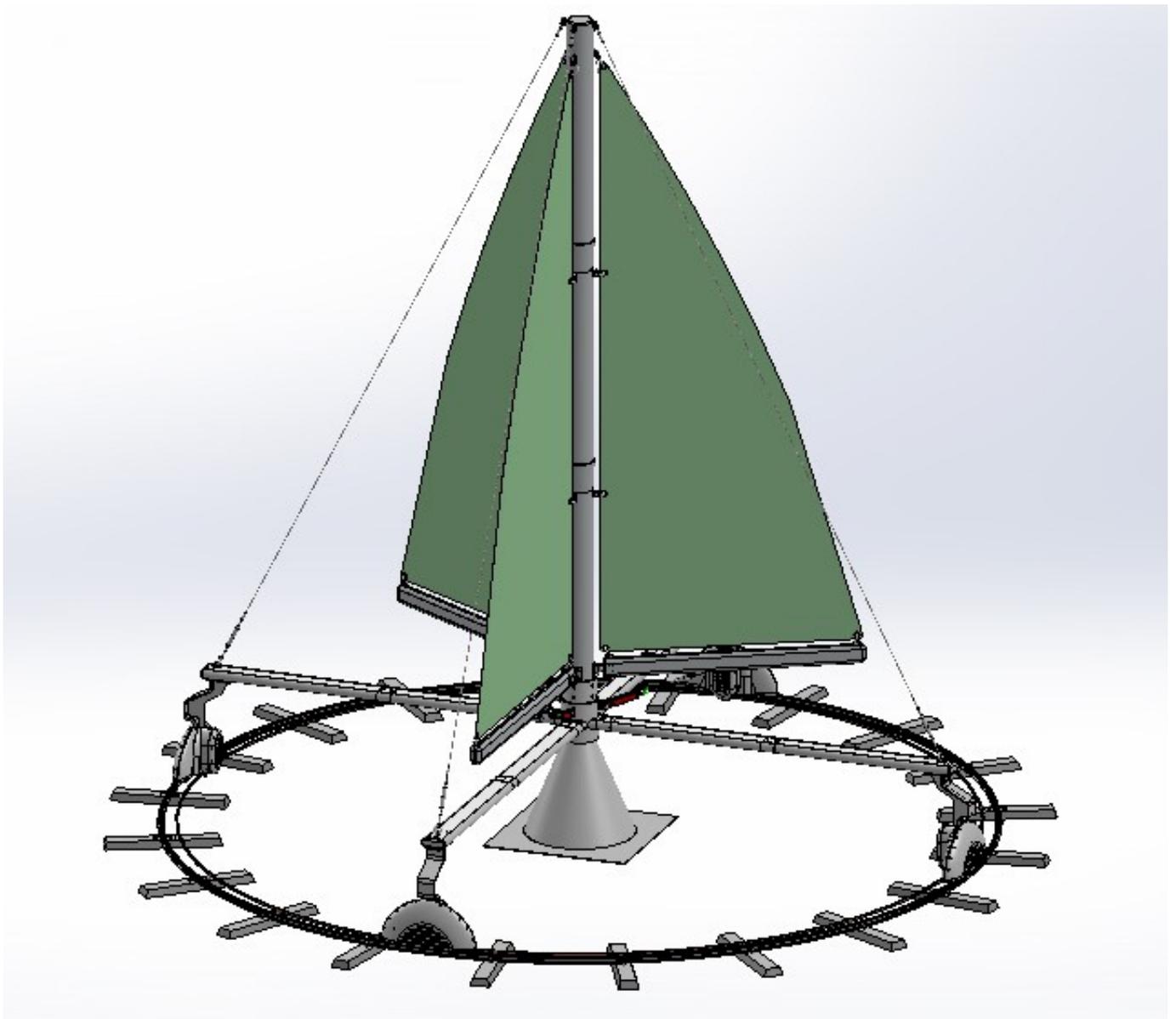
CONCLUSIONI

In conclusione si può affermare di essere riusciti a disegnare ed assemblare al calcolatore un aerogeneratore unico nel suo genere, dotato di alcune caratteristiche innovative ed originali, con l'intento di dare un piccolo contributo allo sviluppo dell'eolico e alla sua diffusione.

È infatti opinione di chi scrive, che sia necessaria per il bene comune non solo una presa di coscienza della situazione critica a livello ambientale in cui il mondo si trova, ma soprattutto la ferma convinzione di voler invertire con i fatti questo trend che ci avvicina inesorabilmente ad un punto di non ritorno; per fare ciò è inevitabile il ricorso alle fonti di energia pulite e rinnovabili di cui l'energia eolica è degna rappresentante.

Come si può vedere in [Fig. 17] nella turbina oltre che a meccanica ed aerodinamica si ritrova anche una tecnologia di tipo “nautico” e solo l'unione di queste tre permette il suo corretto funzionamento.

Nello specifico il vento genera portanza sulle vele secondo le leggi dell'aerodinamica ma queste trasmettono la forza all'albero per mezzo di un collegamento di tipo navale e infine, l'albero si collega ai carrelli e trasmette loro il moto grazie ad accoppiamenti meccanici; senza dimenticare l'ulteriore conversione dell'energia che avviene nei generatori.



[Fig. 17] - *L'aerogeneratore assemblato.*

Come è già stato accennato si è riusciti ad ovviare alla mancanza di fondazioni con l'utilizzo di un ingegnoso sistema di carrelli su rotaia con altrettanti ovvi vantaggi di stabilità e come si nota in [Fig. 17], si è anche aggiunta una lastra in acciaio di 2x2 metri sotto al sostegno dell'albero per mantenere il profilo del terreno in quel punto il più possibile orizzontale e migliorare lo scarico a terra dei pesi.

Il colore delle vele è stato scelto per fondersi con l'ambiente circostante e diminuire l'impatto visivo della struttura che svetta da terra per un'altezza di circa 11.5 metri.

La turbina ha un peso ridotto rispetto ai modelli precedenti per rispondere all'esigenza di facile trasporto e montaggio, senza dimenticare che si è cercato di optare per componenti commerciali oltre che semplici nelle geometrie e nel montaggio in modo tale da abbattere i costi.

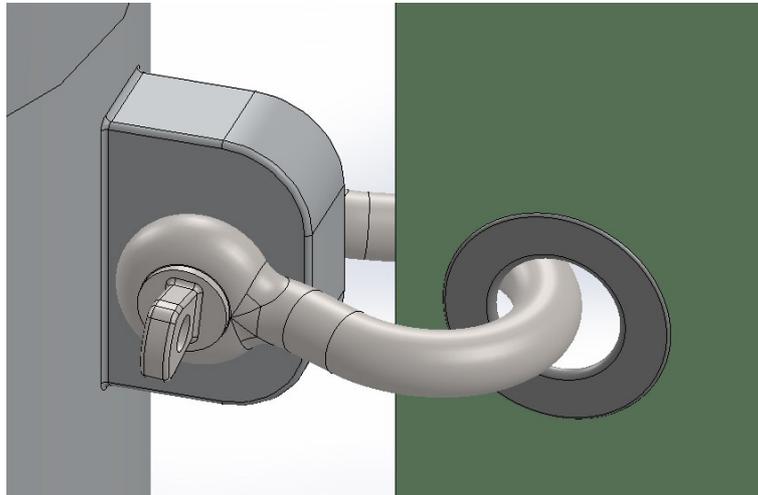
Ad eccezione della piastra d'appoggio, dei perni e degli elementi di giunzione quali ad esempio bulloni e viti, che sono stati realizzati in acciaio, per il resto dei componenti è stato scelto l'alluminio 3.0205 (EN AW-1200) per le sue doti di leggerezza unite alla resistenza [Fig. 18].

Proprietà	Valore	Unità
Modulo elastico	7e+010	N/m ²
Rapporto di Poisson	0.3897	N/A
Modulo di taglio	2.7e+010	N/m ²
Densità di massa	2700	kg/m ³
Resistenza alla trazione	350000000	N/m ²
Resistenza a compressione in X		N/m ²
Snervamento	200000000	N/m ²
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

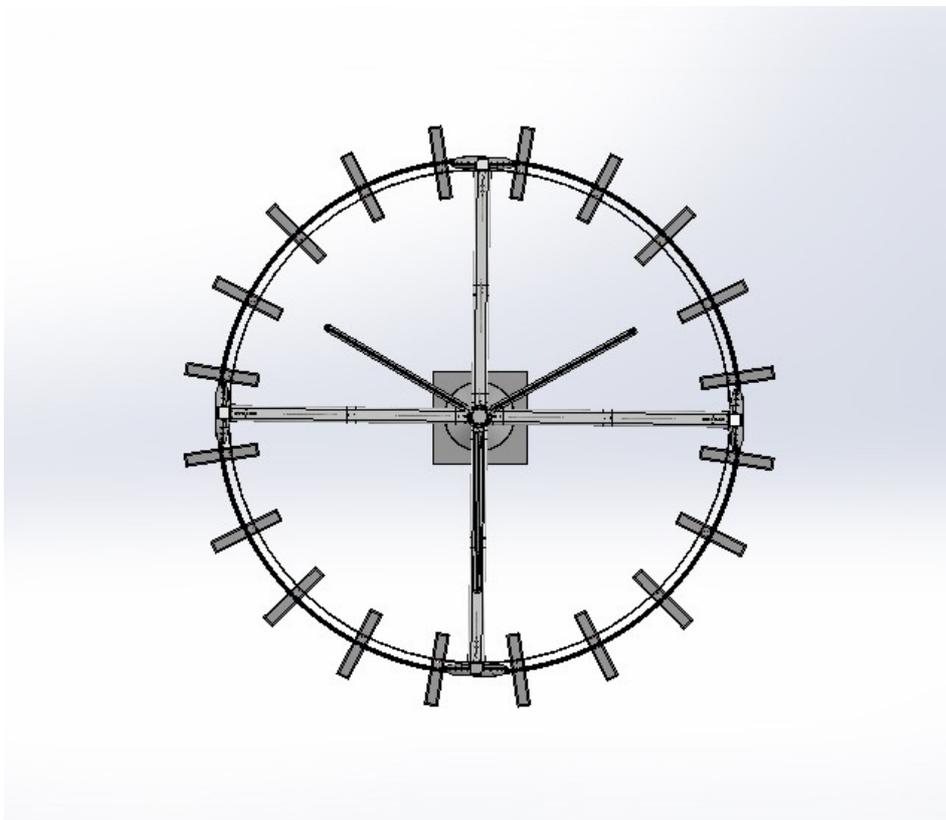
[Fig. 18] - *Caratteristiche dell'alluminio 3.0205 (EN AW-1200).*

Ovviamente questo discorso non vale per le vele che come detto sono realizzate in nylon, un materiale che ha una durata minore e necessita quindi di maggiore manutenzione, soprattutto se si considera che la turbina è esposta agli agenti atmosferici ventiquattr'ore su ventiquattro per 365 giorni all'anno.

Per questo motivo le vele sono collegate all'albero e al boma per mezzo di semplici ganci con perno di serraggio a vite detti grilli [Fig. 19], che semplificano le operazioni di manutenzione e sostituzione del componente, rese possibili con l'ausilio di una semplice scala di lunghezza opportuna.



[Fig. 19] - *Grillo con perno a vite.*



[Fig. 20] - *Vista dall'alto della turbina.*

INDICE

•	<i>PREMESSA</i>	1
•	<i>L'EOLICO</i>	3
•	<i>IL PROGETTO</i>	9
➤	<i>INTRODUZIONE</i>	9
➤	<i>DESCRIZIONE DEI COMPONENTI</i>	10
	- L'ALBERO	10
	- GLI ORGANI DI TRASMISSIONE DEL MOTO	14
	- IL GENERATORE DI CORRENTE	16
	- LA ROTAIA E I CARRELLI	18
	- LE VELE	20
	- IL BOMA E L'AMMORTIZZATORE	22
➤	<i>CONCLUSIONI</i>	23

Software:

SolidWorks 2012