

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

IN

DISEGNO TECNICO ASSISTITO DAL CALCOLATORE

STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DI UN AEROGENERATORE CARRELLABILE

Candidato

BONO IGNAZIO

Relatore

Chiar.mo Prof. Ing. **LUCA PIANCASTELLI**

Anno Accademico 2014 – 2015

Sessione II

INDICE

	<i>Premessa</i>	<i>pag.</i>	<i>1</i>
1	Le fonti energetiche		
	Introduzione	pag.	3
1.1	Le fonti energetiche rinnovabili	pag.	5
1.2	L'energia eolica	pag.	6
2	Modello matematico		
2.1	Cenni di fluidodinamica	pag.	9
2.2	Principio di continuità 2.3	pag.	10
2.3	Teorema di Bernoulli	pag.	10
2.4	Forza esercitata dal vento su un profilo	pag.	11
2.5	Potenza messa a disposizione dal vento	pag.	12
2.6	Influenza dell'altezza del rotore	pag.	13
2.7	Limite di Betz	pag.	14
2.8	Ipotesi alla base della teoria di Betz	pag.	15
3	Analisi delle tipologie di turbine		
3.1	Turbine ad asse orizzontale	pag.	21
3.2	Turbine ad asse verticale	pag.	26
3.3	Turbina Savonius	pag.	27
3.4	Turbina Darrieus	pag.	29
3.5	Orizzontale e verticale a confronto	pag.	32

4 Parametri per il dimensionamento della turbina

4.1	Considerazioni generali	pag.	35
4.2	Criteri di progettazione	pag.	37

5 Studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

5.1	Vincoli progettuali nello studio dell'aerogeneratore	pag.	40
5.2	Il telaio	pag.	41
5.3	Omologazione del rimorchio	pag.	43
5.4	Schema generale della turbina	pag.	46
5.5	La pala	pag.	47
5.6	L'albero primario	pag.	52
5.7	Scelta dei cuscinetti e montaggio	pag.	57
5.8	Trasmissione a cinghia	pag.	59
5.9	Piattaforma di collegamento alla torre	pag.	63
5.10	Stabilizzatori	pag.	66
5.11	Conversione meccanica-elettrica	pag.	69

6 Conclusioni e sviluppi futuri

6.1	Considerazioni sul progetto	pag.	75
6.2	Considerazioni finali	pag.	76

Ringraziamenti pag. 79

Bibliografia pag. 80

PREMESSA

La presente tesi discute la realizzazione di un aerogeneratore della potenza di 5000 W che possa essere montato su un carrello, quindi facilmente trasportabile, e semplice da installare.

Si desidera progettare una macchina che non necessiti di fondamenta e non richieda particolari procedure burocratiche per l'installazione permettendo così un investimento iniziale ridotto.

Il progetto, grazie al calibrato dimensionamento degli elementi, ha il vantaggio di produrre energia con venti di bassa intensità (3 m/s), livelli di rumore contenuti da considerarsi trascurabili e ingombri da ottenere un impatto ambientale accettabile.

Uno degli obiettivi è di massimizzare le prestazioni della turbina eolica ed essere in grado di competere sul mercato attuale.

Queste tipologie di macchine potranno diffondersi nei settori dell'agricoltura, del turismo e in aree specifiche, ad esempio aree protette, dove l'eolico di grandi dimensioni ha difficoltà di inserimento.

L'aerogeneratore potrà alimentare utenze come ad esempio sistemi di telecomunicazioni, stazioni di pompaggio, utenze rurali site in luoghi isolati.

La produzione di energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili viene promossa dal decreto legislativo n. 387 del 29/12/2003.

Tale decreto dà indicazioni affinché tutti gli impianti con potenza non superiore ai 20000W abbiano la possibilità di connettersi alla rete con la modalità di "scambio sul posto". Questo servizio permette di ridurre l'esborso sostenuto per la bolletta relativamente alle quote dell'energia consumata e di rientrare dell'investimento iniziale; infatti la società distributrice dell'energia elettrica effettuerà ogni anno un conguaglio tra l'energia prelevata e quella immessa in rete dal cliente.

1

LE FONTI ENERGETICHE

Introduzione

In previsione dei cambiamenti politico-economici previsti, gli aerogeneratori hanno grandi possibilità di sviluppo sfruttando le energie rinnovabili, cioè quelle energie non soggette ad esaurimento con una produzione di inquinamento ambientale del tutto trascurabile. La normativa italiana considera fonti rinnovabili il sole, il vento, le risorse idriche, le risorse geotermiche, le maree, il moto ondoso e la trasformazione in energia elettrica dei prodotti vegetali o dei rifiuti organici e inorganici. Per definizione sono esclusi da questa categoria tutti i combustibili fossili (carbone, gas naturale, petrolio) poiché soggetti ad esaurimento e l'energia nucleare.

La situazione ambientale attuale è preoccupante e senza una rapida inversione di rotta che porti all'utilizzo di fonti rinnovabili gli effetti sul clima saranno irrimediabili, come mostra la tabella.

Incremento temperatura	Percentuale di emissioni di CO ₂ nel 2050 rispetto a quelle del 2000
<i>2 ÷ 2,4</i>	<i>-85 ÷ -50</i>
<i>2,4 ÷ 2,8</i>	<i>-60 ÷ -30</i>
<i>2,8 ÷ 3,2</i>	<i>-30 ÷ +5</i>
<i>3,2 ÷ 4</i>	<i>+10 ÷ +60</i>

Proprio per garantire la sopravvivenza del pianeta, assieme alla necessità di assicurare un più equo sviluppo sociale ed economico, nel 1997 nella città giapponese di Kyoto, i paesi industrializzati responsabili di oltre il 70% delle emissioni di gas serra, hanno definito un trattato internazionale riguardante il riscaldamento globale, detto protocollo di Kyoto, che individua esplicitamente le politiche e le azioni operative che si dovranno sviluppare e stabilisce tempi ed entità della riduzione delle emissioni di gas serra. Gli stati si sono impegnati a perseguire un modello di sviluppo sostenibile che sia in grado di soddisfare i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere quelli delle generazioni future.

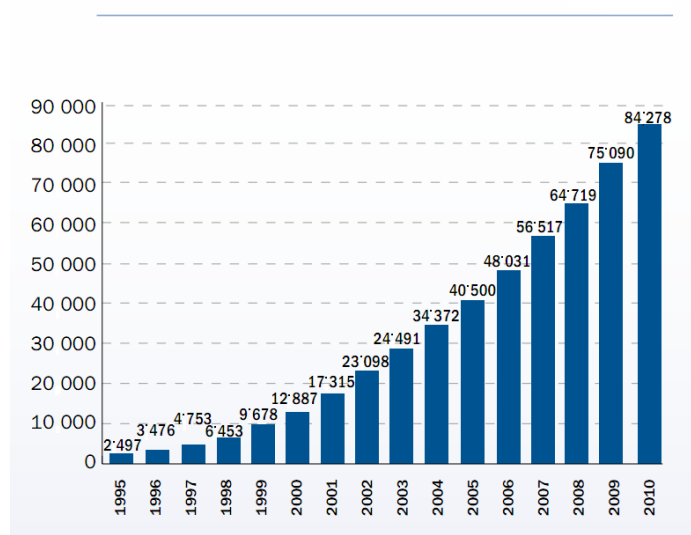
Cap.1 – Le fonti energetiche

I paesi coinvolti hanno attribuito alle fonti rinnovabili un ruolo sempre più strategico nelle scelte in ambito energetico, sia nel tentativo di ridurre la dipendenza economica e politica dai paesi fornitori di combustibili fossili, sia per far fronte alla loro esauribilità e alle diverse emergenze ambientali.

La produzione di energia elettrica per mezzo di combustibili fossili è una delle cause di emissione di anidride carbonica nell'atmosfera, integrarla con l'utilizzo di fonti rinnovabili non potrà risolvere il problema ma può contribuire in modo significativo a una sua riduzione.

L'eolico, in questi termini, è una delle risorse rinnovabili più economiche e si è affermato come uno dei migliori candidati per un futuro sostenibile, nonostante la sua produzione sia condizionata dalla variabilità del vento, che crea discontinuità di produzione di energia. Questo fattore di discontinuità è comune, per motivi diversi, a tutte le fonti rinnovabili. Per la copertura dell'intero fabbisogno rappresenta un buon punto di partenza, utile per l'avvio ad una conversione verso l'impiego di energie pulite.

CUMULATIVE WIND POWER INSTALLATIONS IN THE EU IN MW

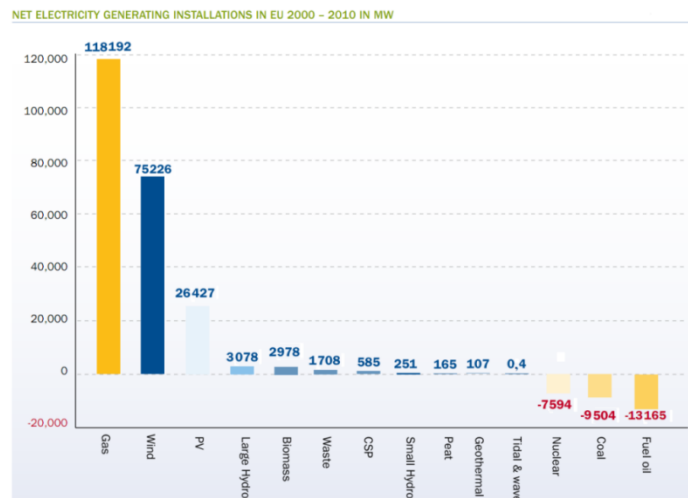


Nel grafico si può osservare quale sia stata la crescita dell'eolico in Europa (espressa in MegaWatt) negli ultimi 15 anni mentre la figura mostra quale sia la tendenza europea negli ultimi 10 anni (sempre espressa in MegaWatt) nei confronti del riassetto delle centrali elettriche, evidenziando un ampliamento di impianti funzionanti a gas naturale, eolici e fotovoltaici, e una sempre maggior tendenza alla chiusura di quelli ad olii combustibili, nucleari e a carbone (dati relativi alla fine del 2011, fonte: EWEA The European Wind Energy Association).

La dipendenza da una risorsa in esaurimento come il petrolio e le paure sul nucleare dopo i drammatici eventi accaduti in Giappone, hanno condizionato l'opinione pubblica, portando alcune nazioni, in

Cap.1 – Le fonti energetiche

primis la Germania, a chiudere le proprie centrali nucleari. Infatti nel corso degli ultimi anni le installazioni di turbine eoliche stanno seguendo il trend evidenziato nel grafico.



L'eolico, come il solare, pur avendo la limitazione di produrre energia in modo non continuativo e la necessità di rilevanti estensioni di territorio ha il vantaggio di non provocare effetti irreversibili sull'ambiente e di poter ripristinare le aree utilizzate senza costi eccessivi.

La situazione dell'eolico in Europa vede una capacità di 84,074 GW (fonte: EWEA The European Wind Energy Association) concentrati maggiormente in Germania (27,214 GW), Spagna (20,676 GW), Italia (5,797 GW), Francia (5,660 GW), Regno Unito (5,204 GW).

1.1 Le fonti energetiche rinnovabili

Si definiscono rinnovabili quelle fonti di energia "non esauribili". Ciò significa che il loro tempo di rigenerazione è molto breve ed è dello stesso ordine di grandezza rispetto al tempo del loro utilizzo.

Fanno parte di questa categoria:

- Energia solare
- Energia eolica
- Energia idroelettrica
- Biomasse
- Energia geotermica
- Energia marina

Cap.1 – Le fonti energetiche

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.

Oggi la maggior parte dell'energia circa l'80% proviene da fonti fossili, ma è sempre più diffusa la preoccupazione riguardo ad un loro prossimo esaurimento. Le preoccupazioni per il disordine sui mercati dei combustibili fossili e le fluttuazioni dei prezzi, nonché il loro impatto ambientale negativo, inducono a privilegiare politiche energetiche sostenibili che includano lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili. Esistono comunque diversi limiti che ne ostacolano il totale impiego, ad esempio il solare e l'eolico sono fonti cosiddette "intermittenti", poiché dipendono dalla presenza di sole e vento, 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. Diventa però conveniente la loro installazione perché il territorio non subisce un impatto ambientale dannoso o antiestetico, sottolineando il fatto che qualsiasi di questi impianti non comporta modifiche irreversibili o permanenti ai danni del territorio essendo possibile lo smantellamento completo.

In seguito verrà trattata solo l'energia eolica.

1.2 L'energia eolica

La terra cede all'atmosfera il calore ricevuto dal sole, ma non lo fa in modo uniforme; nelle zone in cui viene ceduto meno calore la pressione dei gas atmosferici aumenta, mentre dove viene ceduto più calore, l'aria si riscalda e la pressione dei gas diminuisce. Si formano così aree di alta pressione e aree di bassa pressione, influenzate anche dalla rotazione della terra.

Quando diverse masse d'aria vengono a contatto, la zona dove la pressione è maggiore tende a trasferire aria in quelle dove la pressione è minore dando luogo a un flusso di correnti. Il vento è creato dallo spostamento d'aria tra zone di diversa pressione, tanto più alta è questa differenza, maggiore è l'energia generata.

L'uomo ha impiegato l'energia eolica sin dall'antichità, inizialmente per navigare e in seguito per muovere le pale dei mulini utilizzati per macinare cereali, spremere olive e pompare dell'acqua.

Cap.1 – Le fonti energetiche

Se in Europa i primi mulini fanno la loro comparsa intorno agli anni 1100 d.C. l'applicazione più antica, non in campo nautico, risale a circa trentasette secoli fa quando Hammurabi, re di Babilonia, si ipotizza usasse dei mulini a vento per irrigare e prelevare acqua dai fiumi; l'impiego della forza del vento per produrre elettricità invece è storia attuale che risale agli anni tra il 1880 e il 1930 quando ha avuto un forte sviluppo per essere abbandonata nel secondo dopoguerra a causa della diffusione del petrolio, per poi essere ripresa in grande considerazione negli ultimi trenta anni.

La risorsa eolica per essere sfruttata necessita di sistemi in grado di "imbrigliare" il vento, sottraendo parte dell'energia cinetica per convertirla in energia meccanica; quando si ottiene energia meccanica di rotazione da un albero si parla di aeromotori e nel caso specifico in cui l'albero posto in rotazione è quello di un generatore di elettricità si parla di aerogeneratori.

Tra gli aerogeneratori si possono distinguere due categorie: in base alla disposizione dell'asse di rotazione si individuano macchine ad asse orizzontale e macchine ad asse verticale, rispettivamente parallelo o perpendicolare alla direzione del vento.

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

La maggior parte delle turbine è progettata per generare la massima potenza ad una prefissata velocità del vento. Questa potenza è nota come "rated power" e la velocità del vento a cui viene raggiunta è detta "rated wind speed".

Le prime turbine realizzate sia orizzontali che verticali utilizzano un generatore asincrono che presenta la costanza della frequenza, parametro indispensabile per l'immissione di elettricità nella rete elettrica, indipendentemente dalla velocità di rotazione delle pale, superiore a quella di sincronismo. Questa è la scelta più naturale per un impiego di questo tipo, vista la non costanza della velocità di rotazione. Per il funzionamento si utilizza un moltiplicatore di giri con il vantaggio di non utilizzare un generatore di elevate dimensioni, dovute alle coppie polari, e permette alle pale una rotazione con velocità adeguata, ma lo svantaggio di generare perdite meccaniche, possibilità di rotture ed essere fonte di rumore. Ultimamente si realizzano turbine che prevedono un generatore sincrono a magneti permanenti, che genera elettricità a frequenza del tutto variabile. Questo appariva un impedimento insormontabile anni addietro, essendo le turbine ad asse orizzontale con generatore sincrono più costose e più pesanti rispetto a quelle con generatore asincrono. Con l'evolversi dei dispositivi soprattutto in termini di potenze, costi e peso è risultato più intuitivo e vantaggioso usare questi generatori affiancati da un raddrizzatore e da un inverter, che provvedono a raddrizzare in

Cap.1 – Le fonti energetiche

ingresso la corrente a frequenza variabile, trasformandola in continua e operando una nuova riconversione da continua in alternata a frequenza di rete.

Quando si utilizza la turbina per fornire elettricità a qualche utenza senza immetterla in rete oltre ai classici componenti si aggiunge un sistema di batterie per poter accumulare l'energia che viene prodotta in surplus.

2

MODELLO MATEMATICO

2.1 Cenni di fluidodinamica

Per studiare il comportamento del vento sulle pale della turbina eolica si utilizza il metodo sviluppato da Eulero (1707-1783). Il moto del fluido sarà trattato specificando la densità $\rho(x, y, z, t)$ nel punto di coordinate x, y, z all'istante t .

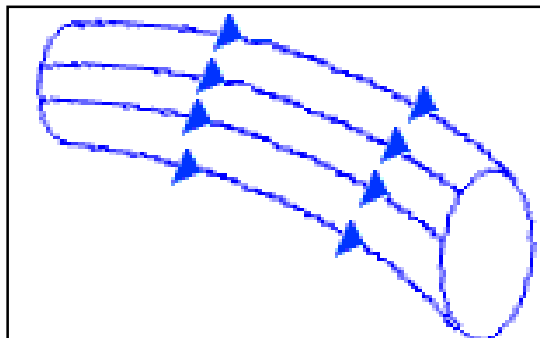
L'attenzione sarà focalizzata su ciò che avviene in un particolare punto nello spazio ad un certo istante, senza considerare quello che accade nello specifico ad una particolare particella di fluido.

Si consideri un qualsiasi fluido in moto, per esempio all'interno di un condotto.

Seguendo il metodo di Eulero, si fissi l'attenzione su un determinato punto della massa fluida $P(x, y, z)$ e si consideri la velocità $v(x, y, z, t)$ di un elemento di fluido che passa nel punto P all'istante di tempo t . In generale tale grandezza è variabile nel tempo, vale a dire che i vari elementi che successivamente passano nel punto considerato hanno velocità diverse.

Conoscendo in tutta la massa del fluido la funzione $v(x, y, z, t)$, si ha una rappresentazione del moto di tutti gli elementi fluidi.

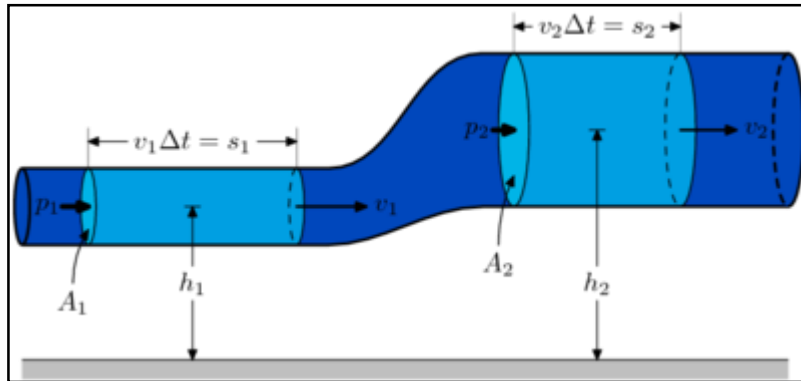
In regime stazionario essi hanno una configurazione costante nel tempo. Un esempio è mostrato in figura nel quale si dimostra che in regime stazionario il moto delle particelle risulta costante.



Tutte le linee di corrente che passano attraverso una generica sezione S formano un tubo di flusso, che può costituire l'intero condotto. Si osservi che le particelle di fluido non possono entrare e

Cap.2 – Modello matematico

uscire dalle pareti laterali di un tubo di flusso, un esempio è mostrato per un fluido in regime stazionario.



2.2 Principio di continuità

Non potendosi avere creazione, accumulazione o perdita indefinita di materia in una qualsiasi regione del tubo, “la massa di fluido che attraversa in un dato intervallo di tempo una sezione del tubo deve essere eguale a quella che passa nello stesso intervallo di tempo per ogni altra sezione”:

$$v \cdot A = \text{costante lungo un tubo di flusso}$$

Il prodotto v per A , che ha dimensioni di un volume/tempo, è detta portata del tubo di flusso.

2.3 Teorema di Bernoulli

In fluidodinamica, l'equazione o teorema di Bernoulli rappresenta una particolare forma semplificata dell'equazione di Navier-Stokes, ottenuta considerando un flusso non viscoso, ovvero flusso nel quale la viscosità può essere trascurata, dall'integrale lungo una linea di flusso, e descrive il moto di un fluido lungo tale linea.

L'equazione rappresenta matematicamente il principio di Bernoulli che descrive il fenomeno per cui in un fluido ideale su cui non viene applicato un lavoro, per ogni incremento della velocità si ha simultaneamente una diminuzione della pressione.

In un fluido ideale in moto con regime stazionario la somma della pressione, della densità di energia cinetica (per unità di volume) e della densità di energia potenziale (per unità di volume) è costante lungo un qualsiasi tubo di flusso.

Cap.2 – Modello matematico

Nel caso di tubo di flusso posto orizzontalmente, indicando con p la pressione e con ρ la densità, si ha:

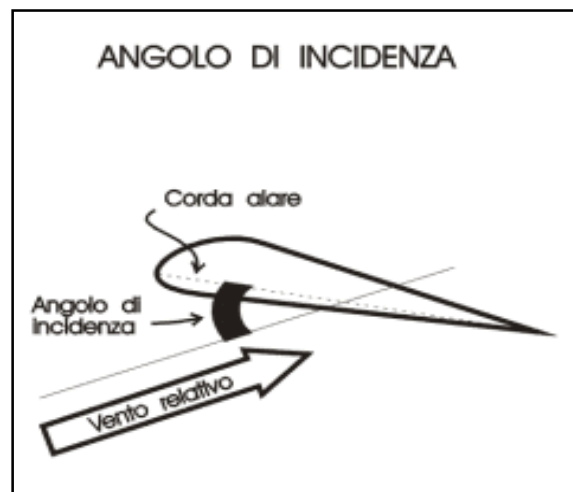
$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{costante}$$

2.4 Forza esercitata dal vento su un profilo

Per determinare la spinta che il vento imprime ad una turbina eolica occorre esaminare brevemente le caratteristiche dinamiche che permettono agli aerei di volare.

Le caratteristiche di volo e la portanza degli aerei sono determinate principalmente dalla loro velocità, dal profilo e dall'angolo d'incidenza (o di attacco) delle loro ali. Il profilo alare è la sezione trasversale di un'ala, dal bordo di entrata a quello d'uscita. L'incidenza alare è definita come l'angolo d'inclinazione, positivo o negativo, della corda alare rispetto alla direzione del vento relativo, ovvero la risultante della somma vettoriale tra la velocità vento reale e la velocità dell'ala.

La corda alare è il segmento ideale che unisce il bordo di entrata a quello di uscita.



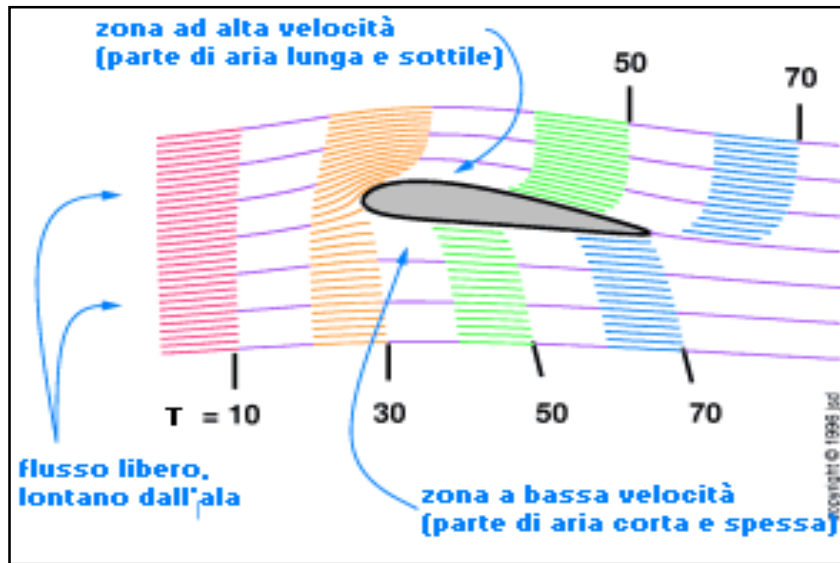
Per verificare come interagisce il vento sull'ala, la si posiziona in galleria del vento, dove l'aria fluisce su di essa da sinistra verso destra. Sopravvento all'ala è sistemata una fila di iniettori di fumo, che viene trasportato dalla corrente rendendo visibili le linee di flusso.

La figura successiva evidenzia alcune importanti proprietà dei modelli di flusso aerodinamici.

Si osserva che l'aria davanti all'ala non si muove solo da sinistra a destra, ma anche dal basso verso l'alto, fenomeno detto upwash (deviazione verso l'alto). Allo stesso modo, una volta oltrepassata l'ala, si nota una deviazione dell'aria verso il basso, detto downwash (deviazione verso il basso).

Cap.2 – Modello matematico

Lungo il bordo d'entrata dell'ala c'è la *linea di ristagno*, che è la linea di divisione fra l'aria che passa sopra l'ala e quella che passa sotto.



I filetti di fumo pulsanti permettono di ricavare altre informazioni. Le zone dove i filetti appaiono allungati sono zone di alta velocità. Ogni striscia, piena o vuota, dura esattamente 10 millisecondi, per cui se copre una distanza maggiore deve muoversi più velocemente.

La massima velocità prodotta da questa ala con angolo di incidenza ideale è circa *due volte* la velocità della corrente libera. I profili alari sono molto efficaci per accelerare l'aria.

Per contro, le zone dove i filetti pulsanti coprono una distanza minore nei 10 millisecondi, devono essere zone di bassa velocità. La velocità minima è zero, e questo si verifica davanti e dietro le linee di ristagno.

Il fumo blu passante stretto e veloce sul dorso dell'ala, compie un percorso più lungo, ma raggiunge il bordo di uscita in un tempo inferiore del corrispondente passante sotto l'ala. La differenza di velocità tra dorso e ventre dell'ala genera le forze di portanza e resistenza che utilizzano gli aerogeneratori per produrre potenza eolica.

L'unica differenza tra i profili alari e le pale delle turbine eoliche è il movimento: traslatorio per l'ala e rotatorio per l'elica.

2.5 Potenza messa a disposizione dal vento

Una vena fluida di massa m in moto laminare a velocità v possiede un'energia cinetica pari a:

$$[1] E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \text{ [Joule]}$$

Cap.2 – Modello matematico

Considerando una sezione trasversale alla direzione del moto, di area A , e misurando la massa m che attraversa A nell'unità di tempo, si ottiene:

$$[2] \quad m^* = A \cdot \rho \cdot v \text{ [Kg/sec]}$$

Dove ρ è la densità dell'aria, che varia con la legge:

$$[3] \quad \rho = \rho_0 + e^{-\left(\frac{0.297 \cdot H_m}{3048}\right)} \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Con H_m l'altezza a cui viene posizionata la turbina e ρ_0 è la densità a livello del mare ad una temperatura di 15 C° ed alla pressione di 1 atm, e vale:

$$\rho_0 = 1.225 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$$

Sostituendo nella [1], m^* al posto di m , si ricava l'energia cinetica presente nella vena fluida nell'unità di tempo. Si può quindi esprimere la potenza cinetica messa a disposizione dal vento come:

$$[4] \quad P = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3 \text{ [W]}$$

2.6 Influenza dell'altezza del rotore

Se la velocità del vento in prossimità del suolo, al livello z_0 , è pari a $V_{(z_0)}$, ad una quota superiore, z , tale velocità aumenta secondo la relazione:

$$[5] \quad v_{(z)} = v_{(z_0)} \cdot (z/z_0)^n$$

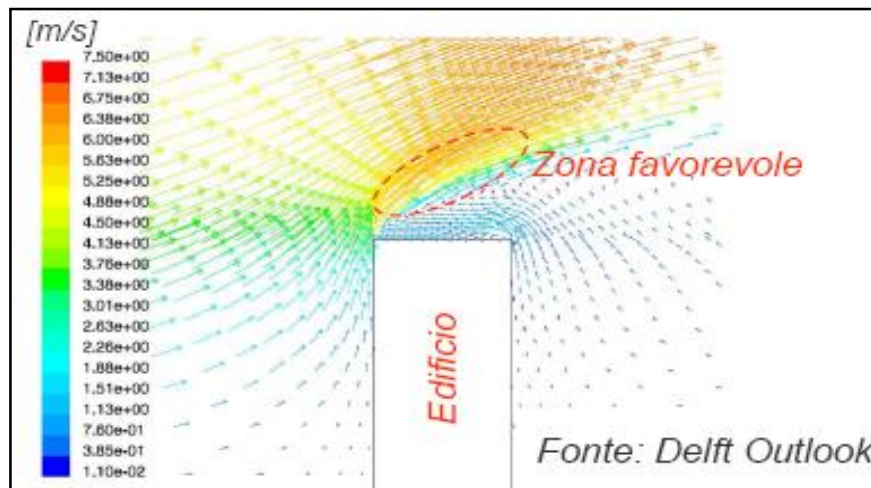
Dove n è un numero compreso tra 0 e 1, chiamato coefficiente di rugosità del suolo.



Cap.2 – Modello matematico

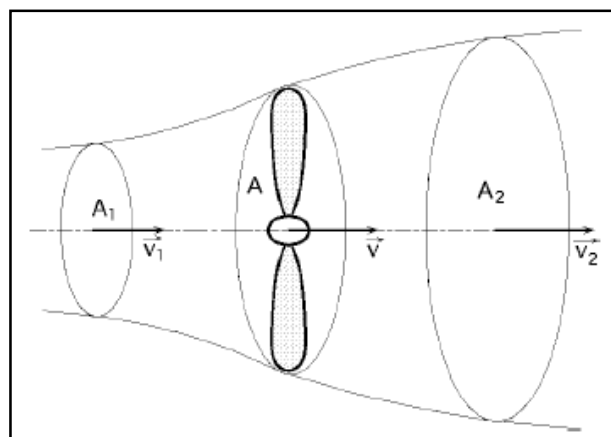
Tale coefficiente vale circa $0.2 \div 0.4$ per suoli mediamente rugosi, dove per rugosità si intende la presenza di corpi quali edifici, alberi, strutture, ecc, che impediscono la linearità del moto del vento. Come si nota in figura a parità di altezza dal suolo tra una zona imperturbata e una zona in cui sono presenti degli ostacoli, si ha una diminuzione del 60% di potenza.

La figura ritrae la zona maggiormente favorevole nella quale installare un aerogeneratore nei pressi di un edificio, il vento proviene da sinistra e le linee rosse indicano le zone in cui c'è minor disturbo della vena fluida, con la possibilità di ricavare la maggior potenza dal vento.



2.7 Limite di Betz

Quando s'interpone un ostacolo al moto della vena fluida, che si muove con velocità v_1 , come avviene per il rotore di un aerogeneratore, accade che la vena fluida si separa, in parte per attraversare l'ostacolo, se questo è permeabile, in parte per aggirarlo. Superato l'ostacolo, la vena si ricompone, ma la sua velocità v_2 è diminuita a causa della cessione di parte della sua energia all'ostacolo stesso.



Cap.2 – Modello matematico

L'energia cinetica raccolta dalla turbina è tanto maggiore quanto minore è la velocità con la quale il vento, rallentando, lascia la turbina stessa. La velocità in uscita sarà compresa tra 0 e il valore della velocità in ingresso.

L'espressione della potenza teorica messa a disposizione dal vento, calcolata precedentemente, vale:

$$[1] \quad P = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3 [W]$$

Se la massa d'aria in uscita dal rotore avesse velocità nulla, la potenza catturata dalla corrente in moto sarebbe pari alla potenza teorica posseduta inizialmente dal fluido. Ipotesi non verificabile, perché in realtà la massa d'aria perfettamente immobile, in quanto priva di energia, impedirebbe l'ingresso della successiva corrente, non permettendo alle pale di ricevere ulteriore energia.

Di conseguenza la potenza catturabile dalla massa di aria in moto risulta inferiore a quella teoricamente posseduta, in particolare ridotta del 60%.

Questo valore deriva dalla trattazione teorica chiamata *Legge di Betz*, che prescindere dalla forma del generatore eolico.

Vengono considerate le seguenti condizioni di lavoro ideali:

- Densità dell'aria secca pari a $1,21 \text{ kg/m}^3$ composta dal 79% di N_2 e dal 21% di O_2 in volume;
- Temperatura di 15°C (288 K);
- Pressione di 1 atm (101325 Pa).

2.8 Ipotesi alla base della teoria di Betz

- a) Concetto di tubo di flusso: il tubo di corrente che attraversa il disco attuatore non interagisce con la restante porzione di fluido che lo circonda;
- b) in ogni sezione del tubo di flusso sussiste una distribuzione di velocità permanente, uniforme e monodimensionale lungo l'asse. Il rallentamento di vena sul disco attuatore è distribuito uniformemente sulla sezione del disco;
- c) nelle sezioni infinitamente a monte e a valle si può ritenere una situazione fluidodinamica indisturbata dalla presenza della macchina, ovvero sussiste la pressione atmosferica dell'ambiente esterno, proprio come nella condizione di getto libero;
- d) il flusso eolico non incontra ostacoli oltre la turbina, né sopravento né sottovento;

Cap.2 – Modello matematico

- e) il vento è stazionario e di intensità costante con la quota;
- f) non ci sono effetti di rotazione della vena a causa dell' "estrazione" di quantità di moto;
- g) si trascura la comprimibilità dell'aria, cioè la densità è ritenuta costante.

L'ipotesi del punto g) è semplificativa, ma comunque ragionevole. Infatti ipotizzando di fermare completamente una vena in moto alla velocità di 10 m/s, l'incremento di pressione sarebbe ampiamente inferiore al valore della pressione atmosferica (101.325Pa).

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} \rightarrow \Delta p = \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho = \frac{100 \cdot 1.21}{2} = 60.5 \text{ Pa}$$

Quando il flusso del fluido incomprimibile si avvicina al rotore, inizia gradualmente a perdere di velocità e di conseguenza aumenterà di sezione sino a raggiungere un massimo quando non risentirà più dell'ostacolo incontrato. Si può quindi dire che la velocità finale è una frazione della velocità iniziale:

$$[2] \quad v_2 = f v_1$$

Con f fattore di interferenza assiale del rotore.

Per ipotesi, nel passaggio dalla sezione 1 alla sezione 2 deve valere sia l'equazione di continuità che l'equazione di conservazione della quantità di moto:

$$\text{Equazione di continuità} \Rightarrow \rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = m$$

$$\text{Conservazione della quantità di moto} \Rightarrow F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \cdot (v_1 - v_2)$$

Dove F è la forza orizzontale esercitata dal fluido sulla macchina.

La potenza istantanea che agisce sul rotore sarà:

$$[3] \quad P = \frac{dL}{dt} = F \cdot \cos \Phi \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) = F \cdot v = m(v_1 - v_2) \cdot v$$

Integrando tra la sezione di ingresso e quella di uscita l'equazione di Bernoulli, sempre sotto le ipotesi di partenza, si ottiene un'ulteriore espressione per la potenza:

$$v \cdot dv + g \cdot dz + \frac{dp}{\rho} + dR + dL = 0 \Rightarrow v \cdot dv + dL = 0 \Rightarrow \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} + L = 0$$
$$L = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \Rightarrow P = \dot{m} \cdot L = \rho \cdot A \cdot v \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Cap.2 – Modello matematico

Il valore assunto dalla velocità del vento in corrispondenza del rotore si determina mettendo a sistema le espressioni [3] e [4].

$$\begin{cases} P = F \cdot v = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2) \cdot v \\ P = \dot{m} \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \end{cases}$$

Risolvendo il sistema rispetto a v si ottiene:

$$[5] (v_1 - v_2) \cdot v = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \Rightarrow v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

La velocità in ingresso al rotore è la media aritmetica tra le velocità della vena nelle sezioni indisturbate. Si può affermare che il rallentamento avviene per metà nel tratto di corrente a valle del rotore e per metà nel tratto di corrente a monte.

Riscrivendo la [5] utilizzando la relazione [2] si ha:

$$[5] v = \frac{1}{2} \cdot v_1(1 + f)$$

Utilizzando l'equazione [4] e sostituendo al posto di v e v_2 , rispettivamente le relazioni [5] e [2], si può scrivere la forza come:

$$F = \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot v_1(1 + f) \cdot \frac{1}{2}(v_1 - f v_1)$$

A cui corrisponde una potenza pari a:

$$P = F \cdot v_1 = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3}_{\text{potenza vento}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2}(1 - f^2)(1 + f)}_{\text{frazione estratta}}$$

La frazione estratta corrisponde al rendimento aerodinamico del rotore, mentre la potenza del vento è la potenza totale che passerebbe nell'area del rotore se non ci fosse la turbina e la deformazione del flusso.

Eseguendo la derivata del rendimento in funzione di f e ponendola uguale a zero per trovare i valori che rendono massimo questo rendimento, si ottiene:

$$\frac{d\eta}{df} = 1 - 2f - 3f^2$$

Da cui si ricavano i due valori:

Cap.2 – Modello matematico

$$f = -1 \vee f = \frac{1}{3}$$

Il valore $f = -1$ non deve essere preso in considerazione in quanto significherebbe che la presenza del rotore non incide sulla velocità della vena fluida.

Sostituendo il valore trovato nell'equazione del rendimento, risulta che il massimo rendimento aerodinamico ottenibile in un generatore eolico vale:

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} \cong 59.3\%$$

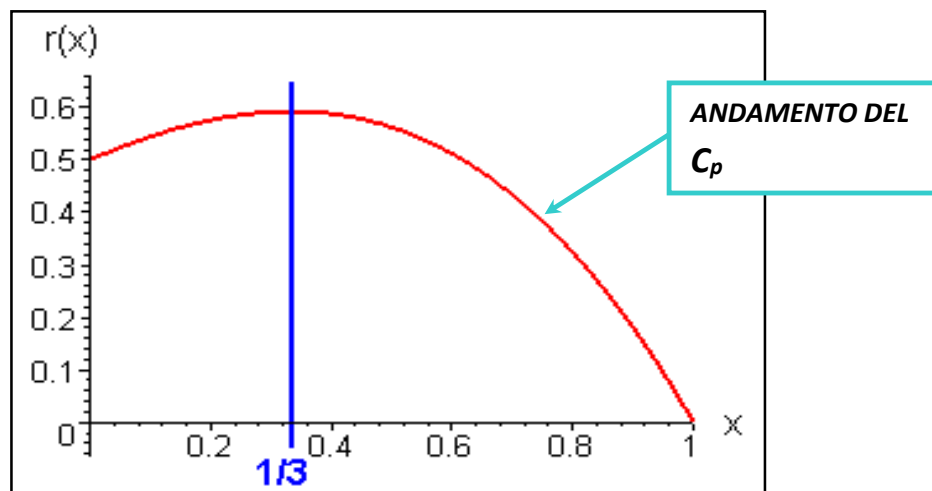
Si può esprimere questo rendimento come coefficiente di potenza indicato con C_p , dato dal rapporto tra la potenza che il generatore è in grado di catturare dal vento e quella posseduta dalla vena fluida indisturbata che si muove con velocità v :

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \frac{1}{2} (1 - f^2) \cdot (1 + f)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} (1 - f^2) \cdot (1 + f)$$

Il quale, come visto, è massimo per $f = 1/3$ e vale:

$$C_p = \frac{16}{27} \cong 0.593$$

Secondo la teoria di Betz si può sottrarre al massimo il 59% della potenza associata alla vena fluida.



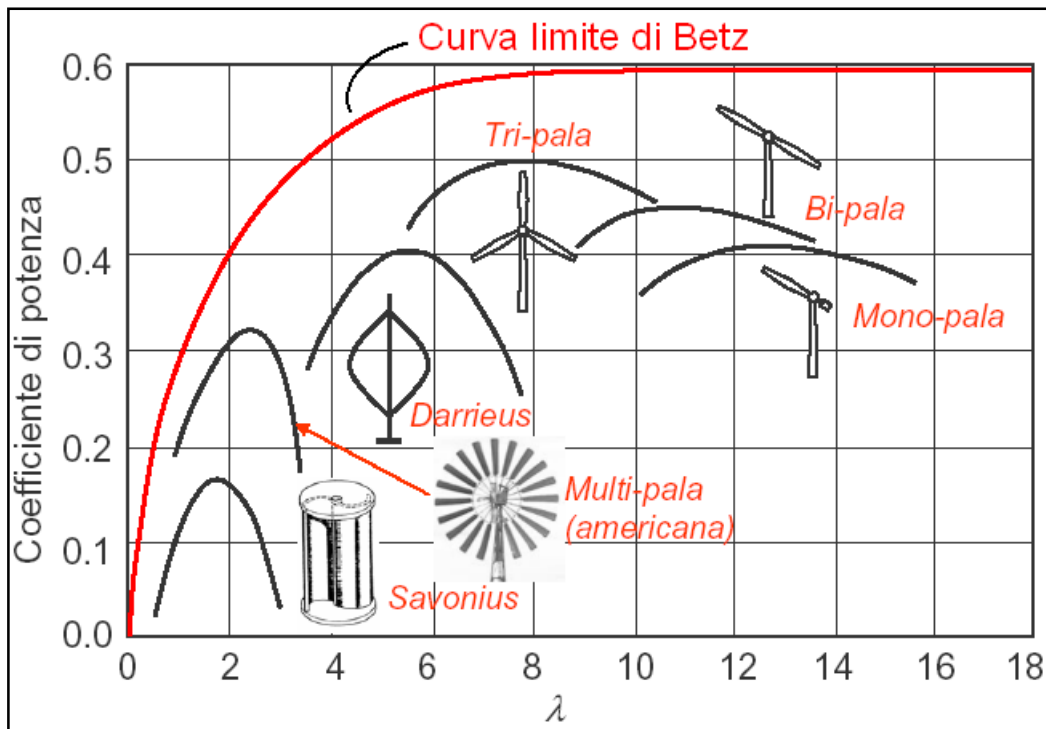
La figura mostra l'andamento del C_p (ordinata), in funzione del fattore di interferenza f (ascissa), si vede come la curva che definisce il C_p ha un massimo per $f = 1/3$, quindi le pale di qualsiasi turbina eolica sono in grado di raccogliere al massimo circa il 60% dell'energia totale trasportata dalla corrente di aria in movimento, senza considerare perdite di natura meccanica o elettrica.

Cap.2 – Modello matematico

Nel momento in cui si considerano tutti gli effetti realmente presenti in una turbina eolica, si rileva che il C_p oltre a risultare inferiore al citato limite di Betz non risulta costante, ma varia con la velocità del vento.

Si esprime questo coefficiente in funzione di un altro parametro, il *blade tip-speed ratio* (λ), definito dal rapporto tra la velocità tangenziale all'estremità delle pale e la velocità del vento:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{u}$$



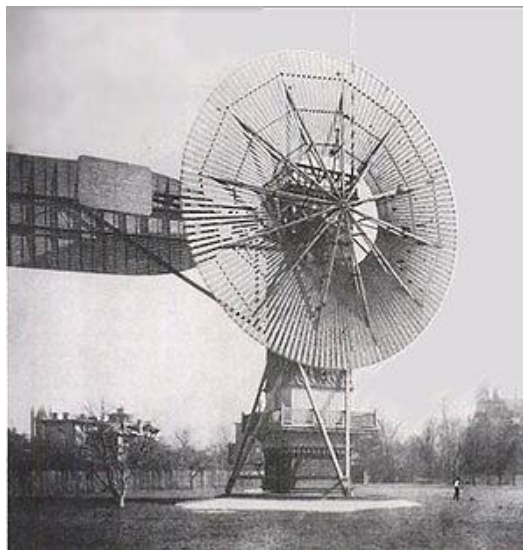
3

ANALISI DELLE TIPOLOGIE DI TURBINE

3.1 Turbine ad asse orizzontale

Uno dei primi tentativi di generare elettricità sfruttando il vento fu fatto negli Stati Uniti nel 1888 da Charles Brush.

Nella turbina di Brush l'aria colpendo un gran numero di pale è costretta a deviare, generando una rotazione di tutta la ruota. Questo tipo di rotore, similmente alle turbine multipala dei ranch americani, usate per pompare acqua, è basato sulla resistenza offerta dalle pale, con una velocità di rotazione molto bassa ed una coppia molto elevata.



L'utilizzo di rotori che si muovono lentamente è stato abbandonato privilegiando rotori più veloci che sfruttano la coppia prodotta dalla portanza e non dalla resistenza.

Come accade in campo nautico dove prevalgono le zone in cui la navigazione avviene per portanza e non per resistenza, anche nel settore eolico dal punto di vista prestazionale è vantaggioso prediligere la forza di portanza, superiore alla resistenza nella maggior parte delle configurazioni.

Le considerazioni fatte comportano un rotore con una maggiore velocità angolare e una minore coppia, con una maggior produzione di potenza, che ben si adatta alla produzione di energia, ma

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

non risulta utile per applicazioni di pompaggio dell'acqua o macinazione del grano. La bassa coppia genera una scia a valle del rotore di minor estensione.



Le moderne turbine eoliche ad asse orizzontale basate su portanza si rifanno al modello introdotto da Marcellus Jacobs la cui macchina prevedeva tre pale, una serie di batterie di accumulazione e un timone direzionale che orientava il rotore al vento. Durante tutto il ventesimo secolo questo tipo di aerogeneratori ha continuato ad evolversi fino a diventare un modello avanzato e di dimensioni sempre maggiori.

Tutti i modelli ad asse orizzontale indipendentemente dal numero di pale presentano caratteristiche identiche: sono costituite 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 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 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 al piano di rotazione del rotore e tramite la sua variazione permette la regolazione dell'incidenza del vento sulla pala, effettuando una regolazione attiva della macchina.

L'angolo di "yaw" è l'angolo di rotazione della navicella sulla propria torre di sostegno. Per il massimo rendimento, la macchina deve essere sempre allineata rispetto al vento, quindi un sistema di movimentazione attivo, formato da attuatori elettrici e relativi riduttori, provvede a movimentare la navicella a seconda della direzione di provenienza del vento, che viene registrata da un apposito strumento (indicatore di direzione) posto nella parte posteriore della navicella stessa.

Nel caso di macchine di piccola potenza la variazione dell'angolo di "pitch" è assente, mentre il controllo dell'angolo di "yaw" viene garantito da un timone che orienta la navicella meccanicamente, senza l'utilizzo di servomeccanismi alimentati da corrente elettrica.

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

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

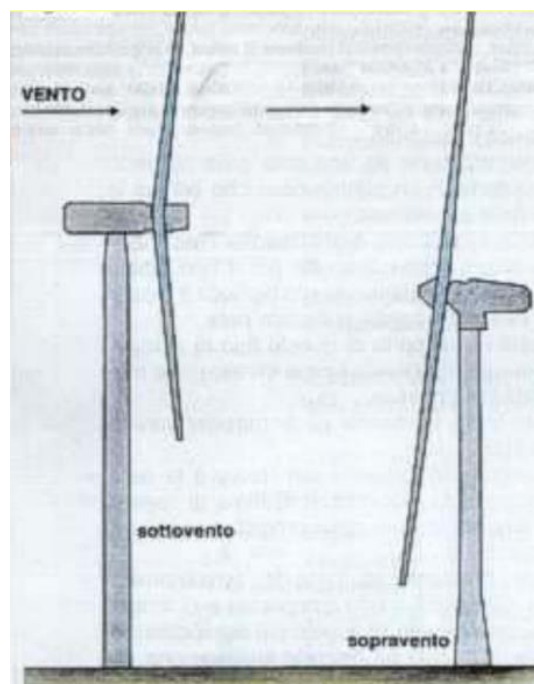


La soluzione costituita da un traliccio, analogo a quello utilizzato per il sostegno dei cavi elettrici, ha lo svantaggio di essere strutturalmente molto rigida e di trasmettere a terra tutti i carichi generati dalla navicella, particolarmente elevati in certe condizioni transitorie.

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

Esistono due modalità di installazione del rotore: sottovento e sopravvento.

La prima non ha bisogno di nessun motore elettrico per lo “yaw control” e nessun timone in quanto le pale sono molto flessibili, creando un cono aerodinamico che allinea la macchina al vento.



Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

Presenta lo svantaggio di generare carichi pulsanti su tutta la struttura facendo sorgere il fenomeno della fatica e il problema della schermatura generata dalla torre, che riducono l'efficienza. Ragione per cui si predilige l'installazione sopravento che garantisce maggior efficienza, pur richiedendo pale più rigide al fine di evitare che la flessione porti ad impattare contro la torre di sostegno.

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. Questo fenomeno di stallo si presenta in prossimità del mozzo e 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: con tre pale montate a 120° l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico tra 30 e 60 giri/minuto. Risulta la configurazione più usata perché, se pur a fronte di costi di trasporto e di costruzione maggiori, è quella con il miglior rapporto costo/potenza sviluppata;



- Rotori bipala: con due pale montate a 180° l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico tra 40 e 70 giri/minuti (superiore rispetto al caso precedente con incremento della produzione di rumore e di vibrazioni). Ha un costo minore dei tripala, ma un peggiore impatto

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

visivo e una efficienza minore risentendo maggiormente della presenza della torre e della variazione di velocità con la quota;

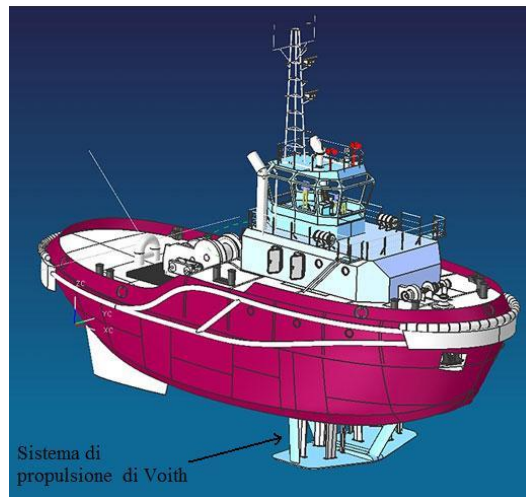


- Rotore monopala: presenta una sola pala munita di apposito contrappeso, è la soluzione meno costosa, di aspetto meno gradevole e risulta la più rumorosa perché la più veloce tra i tre modelli esaminati. È indicata nel caso di siti poco accessibili perché ha un'efficienza minore delle due viste sopra.

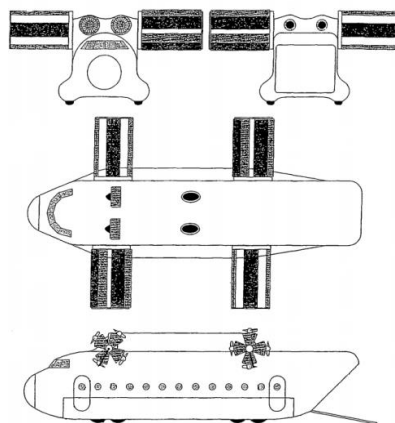


3.2 Turbine ad asse verticale

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 una peculiarità dell'eolico, ma esistono diverse applicazioni che sfruttano tale concetto; 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. In tale sistema le pale utilizzano un passo variabile per realizzare una spinta nella direzione desiderata e migliorare la manovrabilità. Questo propulsore viene tuttora utilizzato.

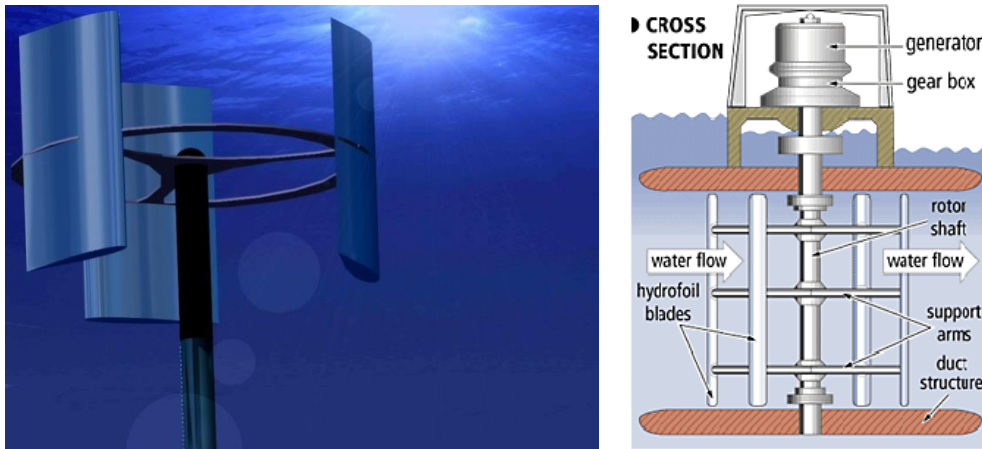


Lo stesso principio utilizzato da Voith potrebbe essere utilizzato in campo aeronautico per generare sia una spinta sia una portanza; questo permetterebbe di realizzare un nuovo modello di aeroplano senza ali e senza le classiche eliche del motore, come descritto nel brevetto e di cui si riporta una immagine.



Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

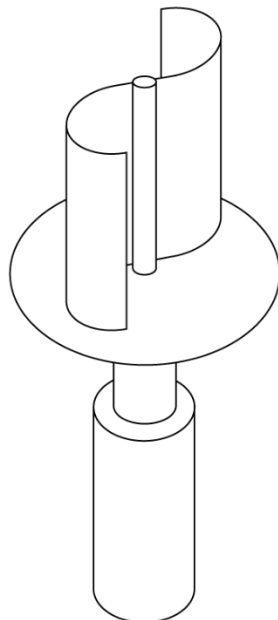
Pale verticali fisse o a passo variabile, si adattano anche su una turbina idraulica fissata sul fondale marino oppure in stazioni galleggianti.



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 paragrafi successivi.

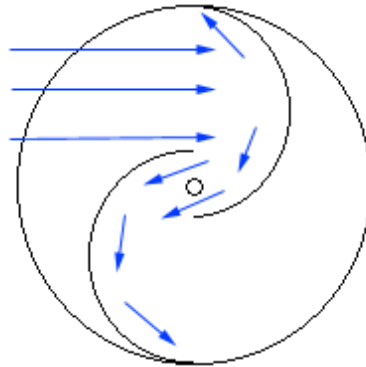
3.3 Turbina Savonius

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



Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

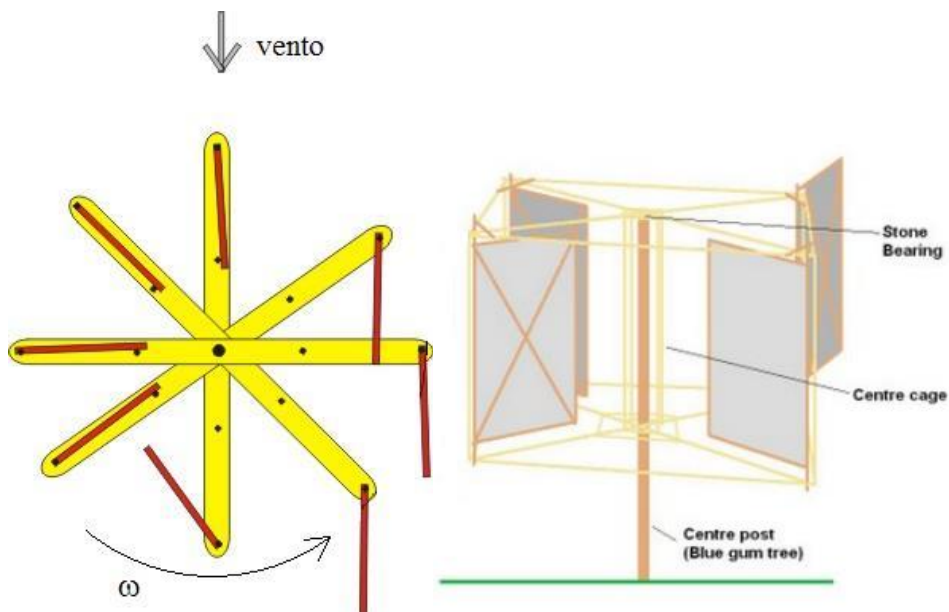
Il vento andando a impattare su un semicilindro mette in rotazione tutto l'albero, in questo modo mentre un semicilindro vede la vena fluida che lo colpisce ridursi lentamente, quello opposto aumentare. Il processo si ripete dando luogo ad una rotazione continua.



Il principale problema della turbina Savonius, che ne limita le prestazioni, è di avere un semicilindro che si muove controvento limitando la coppia prodotta, ma come tutte le macchine verticali, ha il vantaggio di non avere la necessità di essere orientata al vento per funzionare in modo ottimale.

Il Panemone

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



Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

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

L'uso del Panemone potrebbe sembrare redditizio rispetto ad una Savonius, essendo minima la resistenza aerodinamica delle parti che si muovono controvento, ma mentre un Panemone utilizza come superficie resistente utile a generare coppia motrice un pannello piatto, la Savonius utilizzando una forma semicircolare ottimizza tale coppia. La Savonius, rispetto al Panemone, ha l'inconveniente di ridurre la potenza prodotta a causa dei movimenti controvento, ma utilizzando il semicilindro risulta più efficiente nello sfruttare la vena fluida rispetto ad un pannello. Si conclude che le due macchine si equivalgono in termini di prestazioni.

3.4 Turbina Darrieus

Le Turbine Darrieus sono turbine ad asse verticale basate sul principio della portanza, brevettate da Geroge Darrieus nel 1931, sono in grado di produrre potenza al pari o superiore delle migliori turbine ad asse orizzontale attualmente in grandissima diffusione.

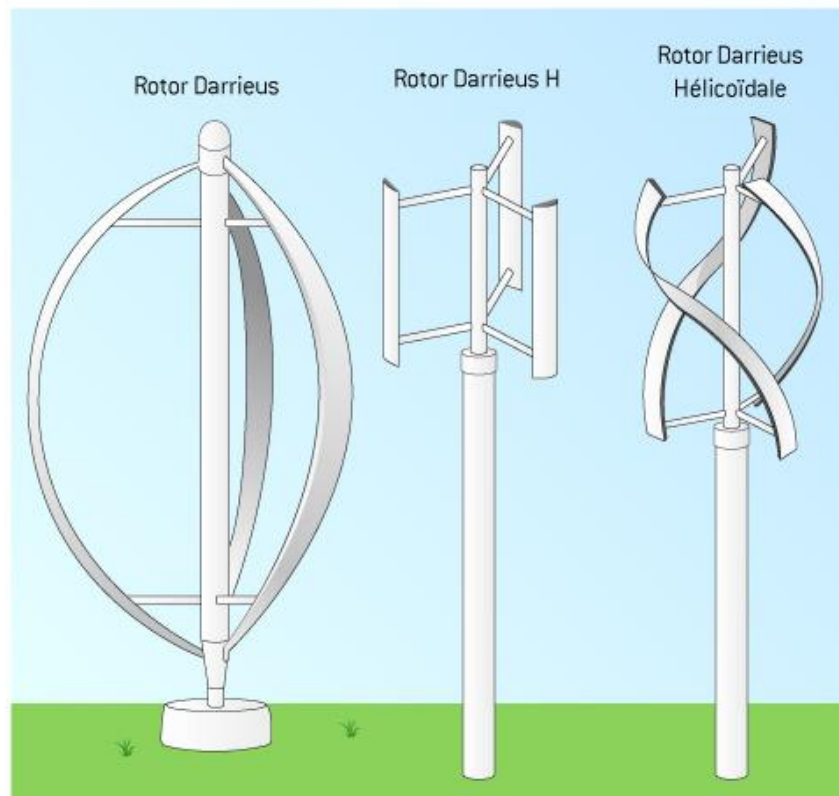
Il nome Darrieus si riferisce a tre classi di turbine ad asse verticale: le “eggbeater”, “H-type”, e la Darrieus elicoidale che si differenziano tra di loro solo per la forma delle pale, ma tutte funzionano sfruttando la portanza creata dal profilo palare.

Le turbine Darrieus sarebbero molto più diffuse oggi se non fosse per un loro limite: il rotore deve essere portato a una velocità minima per far sì che la portanza sviluppata sulle pale sia in grado di movimentare il generatore, con difficoltà di avviamento della turbina.

Una turbina con un numero di pale superiore a uno si potrebbe avviare in qualsiasi posizione solo se in condizioni ideali e grandi velocità del vento. 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. Anche la turbina Darrieus monopala presenta alcune posizioni in cui non si avvia autonomamente. Quindi nella pratica si rende necessario un meccanismo di partenza.

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

Eolienne Darrieus



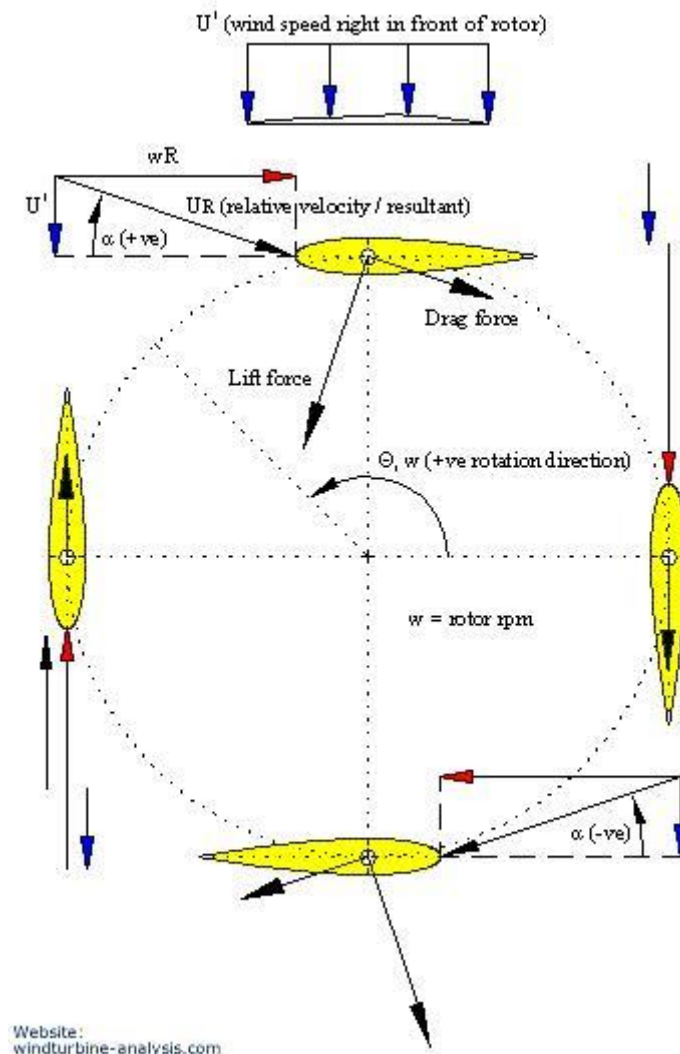
Per superare il problema appena descritto esistono diverse soluzioni, una delle quali consiste nel montare un dispositivo a resistenza (una turbina Savonius) all'interno di una turbina Darrieus esistente. Questa Savonius dovrebbe avere una forma tale da creare abbastanza resistenza per poter muovere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

Un altro sistema per l'avviamento consiste nell'utilizzare elettricità per portarsi nella condizione di auto sufficienza; questo metodo è funzionante, ma non sempre desiderabile, in quanto la turbina deve essere collegata ad una centrale elettrica, limitando l'utilizzo della macchina solo in alcune aree, ad esempio zone offshore nelle vicinanze di reti elettriche.

Le forze trainanti delle turbine Darrieus possono essere descritte in dettaglio con l'aiuto della figura. Si notano due componenti di velocità fondamentali: la velocità del profilo alare, con direzione parallela alla corda e di modulo pari alla velocità angolare moltiplicata per il raggio; la velocità del vento, approssimata con una velocità costante in direzione, modulo e verso. La risultante di questi due vettori è la velocità dell'aria rispetto al profilo alare, cioè la velocità apparente del vento, detta anche velocità relativa. L'angolo tra questa risultante e la corda del profilo alare si chiama l'angolo di attacco α .

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

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



LEGENDA

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

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine

Sempre osservando la figura, in cui sono rappresentate quattro pale con un profilo alare simmetrico, nella posizione $\theta = 0^\circ$ e in quella $\theta = 180^\circ$ si ha $\alpha = 0^\circ$ e quindi rimane solo la 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. Con il profilo asimmetrico l'angolo di attacco per il quale si ha portanza nulla varia da profilo a profilo, permettendo anche con un angolo di attacco nullo la 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; la forza di resistenza, dall'inglese "drag force", con la stessa direzione della velocità relativa rimane e tende a rallentare le pale.

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

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

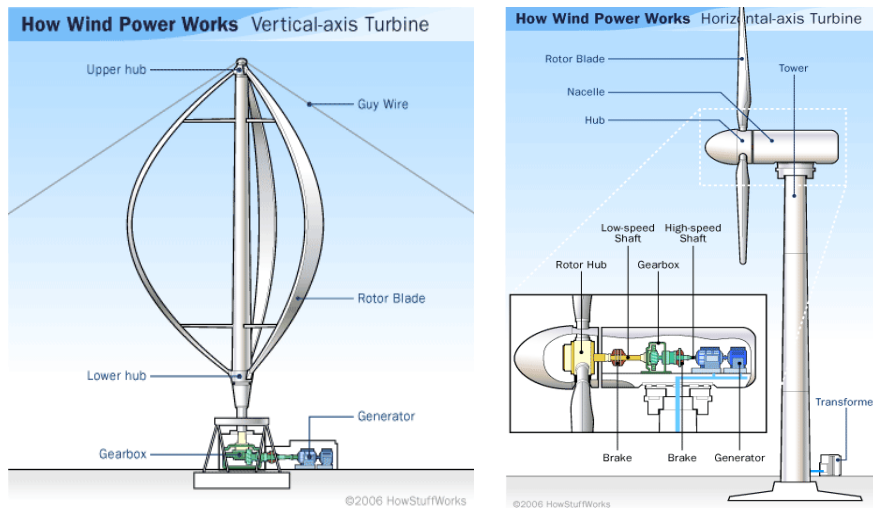
3.5 Orizzontale e verticale a confronto

Le turbine ad asse orizzontale stanno soppiantando quelle ad asse verticale grazie ai costi più favorevoli, anche se l'evoluzione di queste ultime le sta rendendo più competitive.

Le turbine ad asse verticale hanno diversi vantaggi: il generatore essendo posizionato in basso e vicino al terreno facilita le operazioni di manutenzione; le pale si mantengono sempre alla stessa distanza dall'albero principale evitando che si formi quel cono di rumore tipico delle turbine ad asse orizzontale quando la pala passa vicino alla torre di sostegno.

Altri vantaggi sono la maggior semplicità costruttiva delle pale e i minori costi iniziali dovuti all'assenza del sistema di orientamento della macchina, accettando il vento da qualsiasi direzione, al contrario delle turbine ad asse orizzontale che devono essere disposte a favor di vento.

Cap.3 – Analisi delle tipologie di turbine



Si osserva come le macchine ad asse verticale, in genere, avendo altezze inferiori a pari potenza sviluppata, hanno 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.

Vi sono controindicazioni che favoriscono lo sviluppo delle turbine ad asse orizzontale rispetto a quelle ad asse verticale: 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; questa caratteristica e la continua variazione dell'angolo di incidenza durante la rotazione sono la causa di una coppia non costante, variabile da positiva a negativa, che crea il fenomeno della fatica.

Le turbine ad asse verticale sono state oggetto di molte ricerche in passato, soprattutto Sandia National Laboratories concentrò il suo interesse sulle Darrieus e produsse per prima prototipi di dimensioni imponenti di cui si possono trovare numerose pubblicazioni.

Attualmente pur avendo un mercato di nicchia non mancano compagnie che producono aerogeneratori ad asse verticale soprattutto di piccole dimensioni adatti ad un contesto urbano.



4

PARAMETRI PER IL DIMENSIONAMENTO DELLA TURBINA

4.1 Considerazioni generali

La realizzazione del suddetto impianto mobile si articola in due fasi: la progettazione del carrello per il trasporto dell'intero gruppo che risulta la base della struttura e la progettazione della turbina. Si è tenuto conto degli ingombri massimi a disposizione e dei vincoli progettuali imposti dalla legge, per permettere all'impianto di essere installato senza la necessità di autorizzazioni burocratiche.

In questo capitolo verrà trattata solo la fase di progettazione della turbina. È opportuno fare una piccola introduzione sul tipo di impianto che si vuole realizzare e come si colloca nei vari tipi di classificazione. Il generatore appartiene alla classe di impianti di piccola taglia, $D < 20 m$ e $P < 100kW$, e in una concezione più moderna di classificazione, per classe di potenza, si colloca nel campo del *microeolico* con potenze inferiori ai 20 kW. I due tipi di classificazione non sono sempre sovrapponibili. Ad esempio, vi sono aerogeneratori che, pure presentando lo stesso diametro, hanno potenza nominale differente.

Mentre nel campo delle grandi potenze si utilizzano esclusivamente rotor ad asse orizzontale, nel campo del microeolico coesistono entrambe le configurazioni, sia ad asse orizzontale che verticale. In ambito urbano, i rotor ad asse verticale presentano un minor impatto paesaggistico e una maggiore adattabilità a flussi turbolenti. L'aerogeneratore trattato è un generatore ad asse orizzontale (HAWT – Horizontal Axis Wind Turbine).

Un parametro importante nel funzionamento delle turbine è la solidità:

$$\sigma = \frac{\text{superficie totale delle pale}}{\text{area del disco battuto}}$$

Maggiore sarà il numero di pale, quindi la superficie da loro occupata, tanto più grande risulterà questo valore. Da questo parametro ne dipende un altro fondamentale nelle turbine: il λ , ossia il rapporto di velocità periferica (TIP SPEED RATIO):

Cap.4 – Parametri per il dimensionamento della turbina

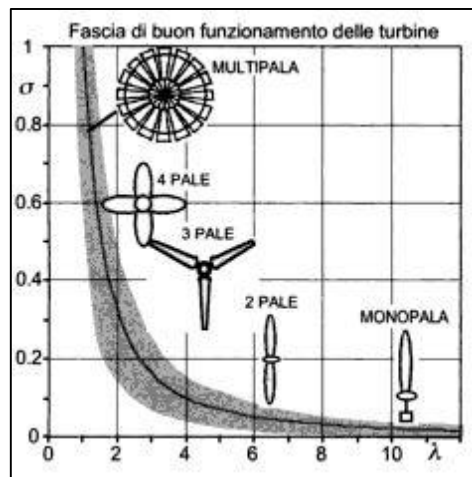
$$\lambda = TSR = \frac{u}{V} = \pi \frac{D N_r}{60 V_0}$$

Al diminuire della solidità, aumenta il λ . Infatti minore è la solidità della pala e di conseguenza la frazione di area del tubo di flusso effettivamente occupata, più elevata dovrà essere, per una data velocità del vento, la velocità di rotazione delle pale, affinché possano influenzare in maniera considerevole le linee di corrente e estrarre la massima energia.

Per avere un'elevata efficienza occorre aumentare la distanza tra le pale, onde evitare la scia di perturbazione che si crea.

Questo spiega perché le turbine più veloci devono avere poche pale, ovvero bassa solidità σ .

In figura si osserva l'andamento del λ , in funzione della tipologia di turbina.



Per una data velocità del vento V , un elevato valore di λ richiede elevati diametri oppure un elevato numero di giri consentendo elevate potenze. Per questo motivo, le turbine di bassa solidità che operano con venti mediamente intensi sono più adatte ad azionare sistemi eolico elettrici, al contrario di quelle multipala ed elevata solidità che si prestano più a turbine che azionano pompe alternative, richiedenti elevate coppie d'avviamento.

Nel caso in questione si è adottata una turbina tripala, che è quella con il miglior rapporto costo/potenza sviluppata, compatibilmente con gli ingombri a disposizione sul carrello da omologare.

Nel caso in esame, in condizioni nominali l'albero primario ruota ad una velocità di 300 rpm, mentre il generatore richiede una velocità di 1500 rpm. È necessario un rapporto di moltiplicazione di 5:1 che verrà realizzato con un collegamento a cinghia tramite due pulegge di differente diametro.

4.2 Criteri di progettazione

Cap.4 – Parametri per il dimensionamento della turbina

La progettazione di una turbina eolica è basata sullo studio dei profili medi del vento presente nel sito d'installazione.

Il vento rappresenta un movimento di masse d'aria rispetto alla superficie terrestre all'interno dell'atmosfera. Questo trasporto di energia cinetica è dovuto essenzialmente a due fattori: la rotazione terrestre e la differenza di temperatura tra due zone contigue. Per questo motivo l'eolico è un'energia di "derivazione solare".

Di norma, per valutare il potenziale eolico e la producibilità di energia elettrica in una regione, si procede ad un'analisi delle condizioni anemologiche del territorio tramite rilevamenti effettuati con centraline del vento, costituite da anemometri e indicatori di direzione, posti ad una altezza variabile dai 5÷10 fino ai 60 metri.

Gli anemometri forniscono una velocità media in un intervallo di tempo che verrà elaborata tenendo conto della stagionalità dei venti, prendendo come riferimento periodi di tempo sufficientemente grandi, dell'ordine di 2 o 3 anni.

Per un impianto mobile, non si può far uso dello studio delle mappe eoliche, ma si suppone una velocità media del vento di circa 11m/s e si pone λ uguale agli usuali valori per i tripala. Tenendo conto delle precedenti valutazioni risulta $\lambda = 7$.

$$P_r = \frac{1}{8} \rho C_p \pi D^2 V^3$$

Stabilito il valore del rapporto di velocità periferica si ricava la *potenza aerodinamica*, tenendo conto del diametro della pala da progettare, $D = 4,5\text{ m}$.

Considerando un valore tipico del coefficiente di potenza $C_p = 0,5$ la potenza P_r risulta uguale a $6,4\text{ kW}$. Data la velocità di rotazione dell'albero primario di 300 rpm , la coppia aerodinamica si ricava dalla seguente formula:

$$M_r = \frac{P_r}{\omega_r} = 188\text{ Nm}$$

Si calcola infine la conseguente spinta aerodinamica

$$T = C_T \frac{1}{2} \rho A V^2$$

5

STUDIO DI FATTIBILITÀ DI UN MICROAEROGENERATORE MOBILE

Lo studio del progetto ha l'obiettivo di realizzare un aerogeneratore mobile ad asse orizzontale che abbia la caratteristica tecnica di produrre una potenza di circa 6400 W in condizioni di ventosità medie di 11m/s.

La soluzione cercata deve risultare commercialmente competitiva con altri aerogeneratori presenti sul mercato.

La funzionalità principale del progetto è quella di poter utilizzare l'aerogeneratore su un carrello appendice con massa a pieno carico inferiore ai 750 kg in quanto questa tipologia può essere utilizzata da qualsiasi utente munito di patente B.

Oltre alla produzione di energia elettrica, il progetto prevede la possibilità di poter utilizzare il carrello appendice come strumento per trasportare merci, una volta messo l'aerogeneratore in posizione di riposo e smontato dai supporti.

Lo studio inizia esaminando le caratteristiche e i dati tecnici della soluzione carrello appendice con aerogeneratore.

Per ottenere la soluzione ottimale si è tenuto conto dei seguenti parametri:

- *INGOMBRO*
- *EFFICIENZA*
- *COSTI*
- *ESTETICA*

5.1 Vincoli progettuali nello studio dell'aerogeneratore

Si vuole realizzare una struttura compatta, che possa essere utilizzata da qualsiasi operatore munito di patente B, in modo da eliminare tutti i costi dovuti al trasporto di merci con mezzi tipo autocarri per i quali l'utilizzo è riservato solo ad utenti muniti di patente C.

A questo scopo si pone una limitazione dimensionale che è di 4000 mm della lunghezza e 1400 mm della larghezza di un pianale di un carrello appendice, con altezza dal suolo di 400 mm.

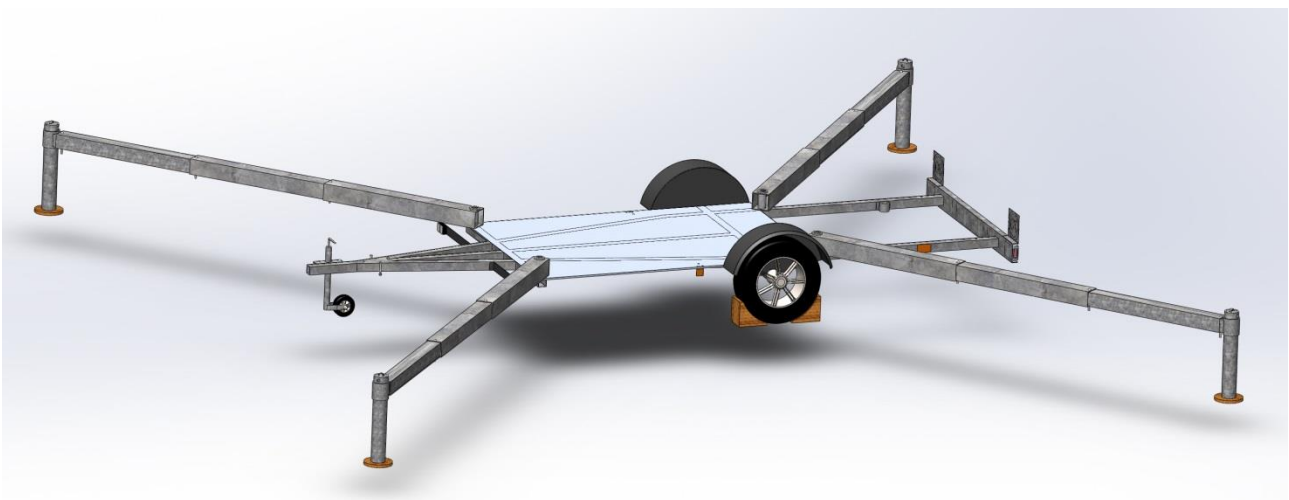
Per l'installazione dell'aerogeneratore non è previsto l'utilizzo di piccole gru o carrelli elevatori in quanto la torre, essendo sostenuta da pistoni idraulici, può essere inclinata e portata ad altezze dell'ordine del metro.

Sono favoriti i collegamenti con l'utilizzo di perni per poter consentire un montaggio facilitato direttamente sul posto, mentre per i componenti saldati si assicura il trasporto delle parti già assemblate.

Deve essere privilegiata la semplicità costruttiva, tenendo conto di eventuali operazioni di sostituzione di eventuali parti rotte e usurate.

La messa in esercizio dell'aerogeneratore richiede circa 30÷40 minuti e può essere effettuata da qualsiasi utente, in quanto la semplicità delle operazioni non richiede nessun tipo di specializzazione.

Per evitare problematiche dovute all'instabilità, il carrello appendice è dotato di quattro bracci telescopici che aumentano la superficie di contatto con il suolo (fino a 6500 mm), mentre la torre è vincolata nei punti di appoggio con funi d'acciaio.



Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Compatibilmente con i criteri di resistenza, la struttura deve essere il più leggera possibile, per far sì che il momento d'inerzia all'avviamento e la coppia resistente siano di modesta entità, in modo da ottenere un aumento della coppia massima utile.

La potenza nominale di progetto è di 6,4 kW con un vento di 11 m/s che corrisponde, secondo la “scala Beaufort”, ad un vento teso (grado 5); questa potenza è ottenuta tramite un accoppiamento tra rotore e generatore.

Non è previsto nessun intervento dell'operatore durante il funzionamento della turbina che si attiva ogni qualvolta il vento lo permette. Sono previsti interventi di manutenzione affinché l'aerogeneratore riesca a raggiungere una vita minima di 20 anni.

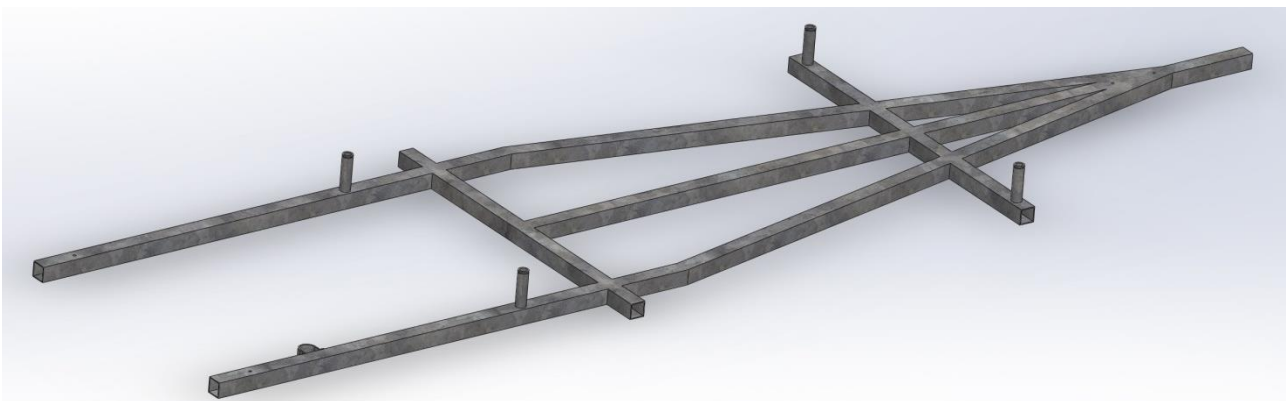
Le condizioni atmosferiche a cui la turbina garantisce un rendimento dell'85% sono comprese tra 30°C e +50°C.

L'utilizzo è consigliato lontano dalle residenze civili, per evitare le turbolenze generate dalla vicinanza della turbina alle pareti delle abitazioni, che comporterebbero la diminuzione delle prestazioni. Si vuole comunque realizzare una struttura di aspetto gradevole che produca un rumore di intensità trascurabile.

Questo sistema permette di garantire energia elettrica rinnovabile in molte situazioni, ad esempio casolari in montagna, capanni da pesca, stabilimenti balneari, abitazioni che ancora non sono state raggiunte dalla rete elettrica nel massimo rispetto dell'ambiente e della fauna.

5.2 Il telaio

Il telaio del carrello deve risultare idoneo sia alla circolazione su strada sia a sorreggere il peso dell'aerogeneratore. Per realizzarlo viene impiegato del tubolare in acciaio quadrato di sezione 60 mm per 60 mm di spessore 3 mm.



Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Per garantirne l'utilizzo deve essere conforme alle normative del codice della strada. È dotato di un solo asse. La struttura in acciaio ha una massa di circa 52 kg.

Sul tubolare è fissata una lamiera di acciaio di 2 mm opportunamente tagliata e piegata per dare alla struttura la rigidità necessaria del peso di 44 kg.

Il carrello è munito di un timone per poterlo agganciare all'autovettura, 2 ruote da 155/80/R13, ed è sprovvisto di impianto frenante che riduce la massa complessiva a circa 140 kg.

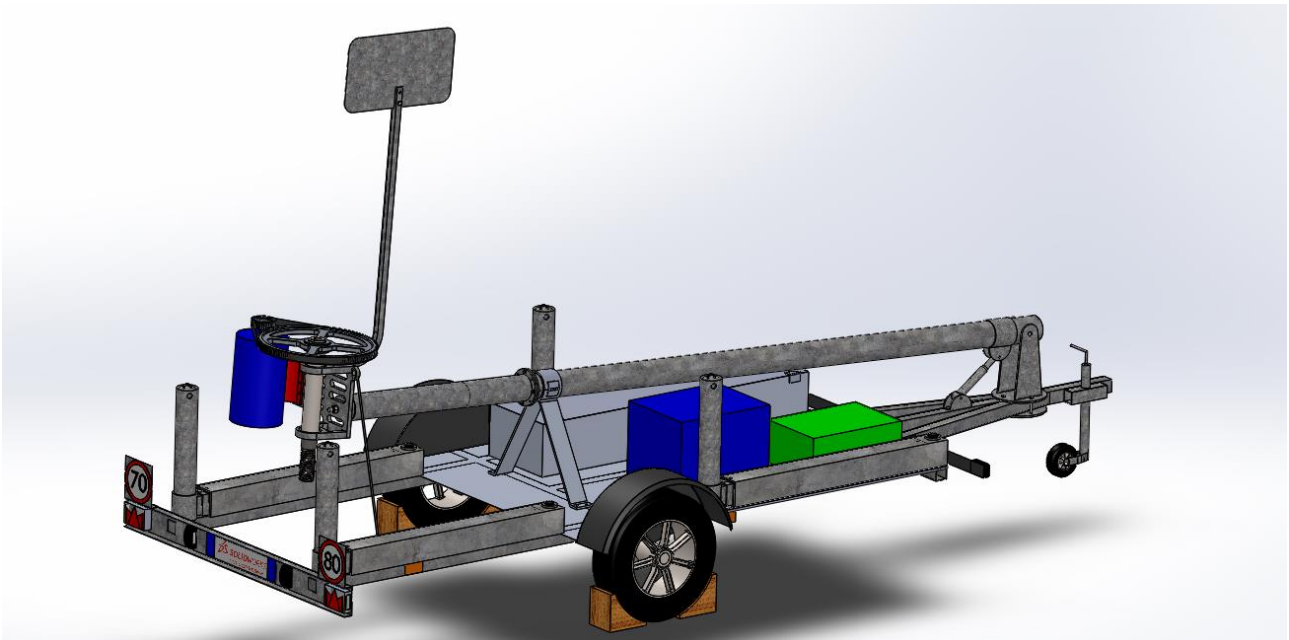
Per permettere alla torre di compiere una rotazione attorno all'asse del perno, nella fase di messa in funzione, viene fissata una staffa opportunamente piegata, saldata e forata.

Questa viene posizionata all'estremità del carrello per poter sfruttare tutta la lunghezza consentita e avere un punto stabile di applicazione.

La torre è realizzata con un tubolare in acciaio INOX AISI 304 di spessore 3 mm, diametro 120 mm e di lunghezza 3150 mm, alla quale, per mezzo di una flangia, è vincolato un pistone a semplice effetto in alluminio dotato di 3 sfili con un diametro iniziale di 120 mm e uno finale di 108 mm.

Questo meccanismo permette all'aerogeneratore di raggiungere un'altezza di circa 6000 mm.

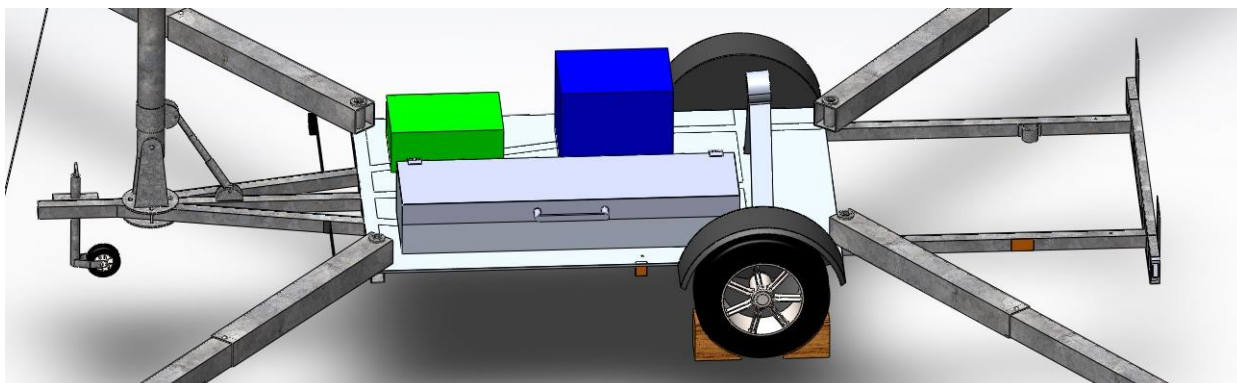
Per garantire la stabilità della turbina vengono impiegati quattro cavi elastici vincolati all'estremità della flangia del tubolare in INOX AISI 304 e ai piedi degli stabilizzatori.



In figura è rappresentato il carrello appendice con l'aerogeneratore eolico in fase di non utilizzo.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

La figura sottostante mostra la presenza del cassettone, che permette di trasportare gli elementi smontabili.



Il carrello è inquadrato come USO SPECIALE. Gli oggetti trasportati nel cassettone sono connessi all'uso del rimorchio, è possibile trasportare materiale inerente al montaggio e alla messa in sicurezza dell'impianto (tiranti, cunei, piedi stabilizzatori, etc).

5.3 Omologazione del rimorchio

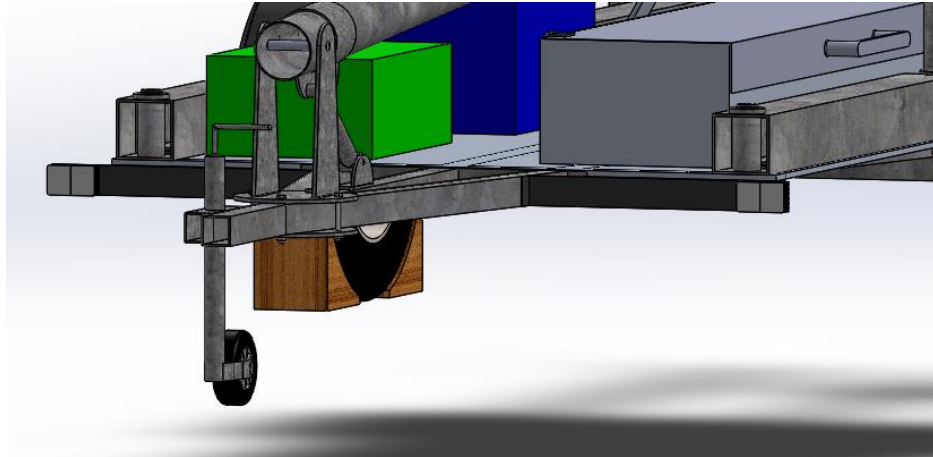
Per ottenere l'omologazione del carrello è necessario rispettare tutte le normative vigenti, obbligatorie per la circolazione stradale, partendo dal codice della strada nazionale (D.L. n285 del 30/04/1992) fino ad arrivare alle direttive parziali sulle caratteristiche e sui vari dispositivi del rimorchio.

In seguito sono elencate le normative che sono state seguite dal progetto di tesi:

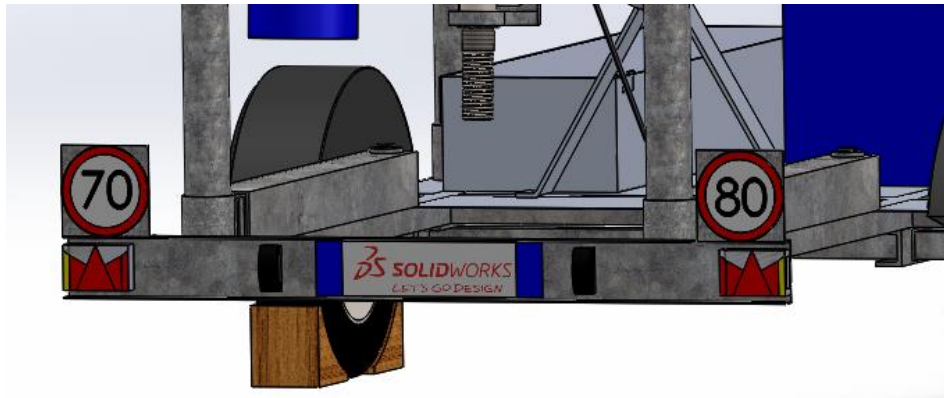
- CATEGORIA VEICOLO: O1;
- LUCI OBBLIGATORIE: per l'omologazione è necessario rispettare tutte le normative riguardanti le luci di arresto, di targa, di posizione anteriore e posteriore, fendinebbia, indicatori di direzione e catadiottri posteriori triangolari, laterali e frontali;
- SEDE TARGA: la sede della targa deve avere un'altezza minima di 120 mm e una larghezza di 520 mm;
- INDICATORI DEI LIMITI DI VELOCITÀ: è necessario indicare i limiti di velocità massima consentiti durante il trasporto del rimorchio, i quali sono di 70 km/h in strade extraurbane e 80 km/h nel caso di percorrenza autostradale;

In figura si mostra la disposizione delle luci anteriori.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile



In seguito si illustra la disposizione del gruppo posteriore, con sede targa, indicatori di velocità e luci posteriori.



- **ACCESSORI:** cunei. I cunei sono obbligatori, essendo il rimorchio sprovvisto di impianto frenante. Nel momento dello sgancio del rimorchio dal veicolo occorre bloccarlo prima che venga montato il sistema stabilizzante;



- **PNEUMATICI:** 155/80/R13

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

- PARAFANGHI: i parafanghi devono rispettare la seguente direttiva.

► B

DIRETTIVA DEL CONSIGLIO

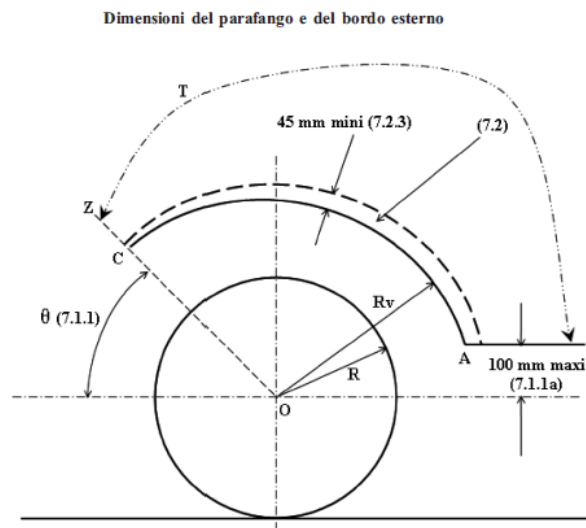
del 27 marzo 1991

concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai dispositivi antispruzzi di alcuni veicoli a motore e dei loro rimorchi

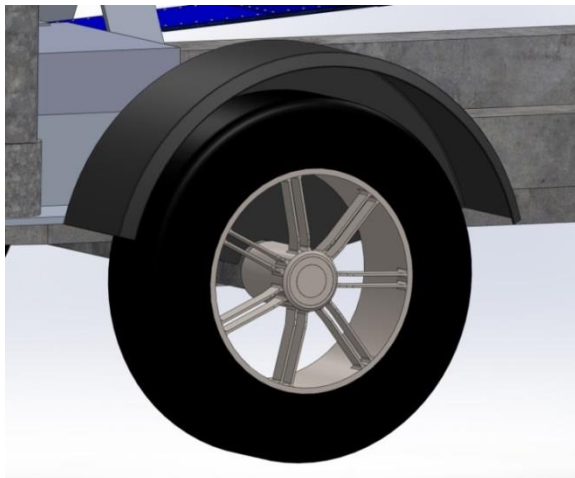
(91/226/CEE)

(GU L 103 del 23.4.1991, pag. 5)

Questa direttiva specifica le dimensioni, gli angoli e le lunghezze ammissibili, le quali andranno seguite per la scelta del parafango da montare.



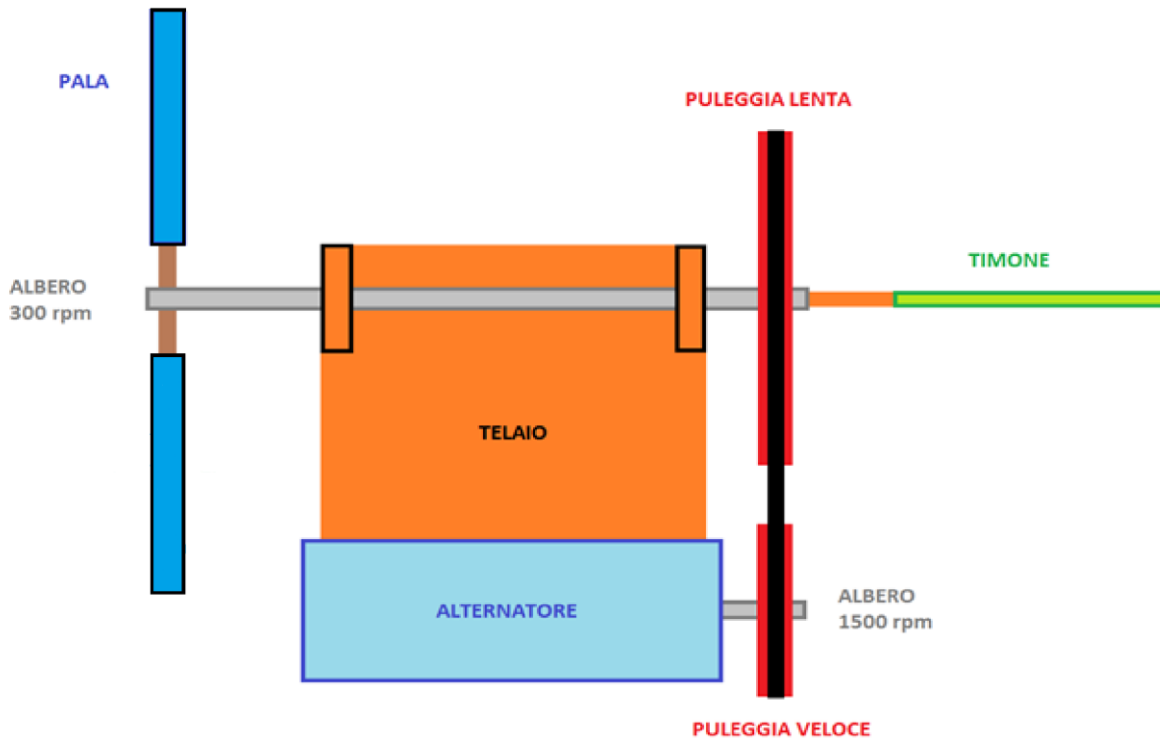
Di seguito vi è il montaggio della ruota con il parafango scelto per il rimorchio:



5.4 Schema generale della turbina

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Dopo aver illustrato la realizzazione del carrello, si procede con la fase di progetto della turbina eolica. Nella rappresentazione schematica della figura sottostante, si mostrano gli elementi principali che verranno analizzati nel presente capitolo, spiegando di volta in volta le scelte progettuali e i relativi vincoli imposti dalle specifiche di progetto.



Lo schema ha lo scopo di dare un'idea generale della realizzazione dell'impianto.

Tornando allo schema, si nota come le pale siano collegati direttamente all'albero primario che ruota ad una velocità di 300 rpm.

L'albero primario è vincolato con i relativi cuscinetti montati e bloccati assialmente da una ghiera. Gli appoggi sono sollecitati da una spinta aerodinamica, calcolata precedentemente, ma soprattutto da un momento giroscopico che verrà trattato successivamente.

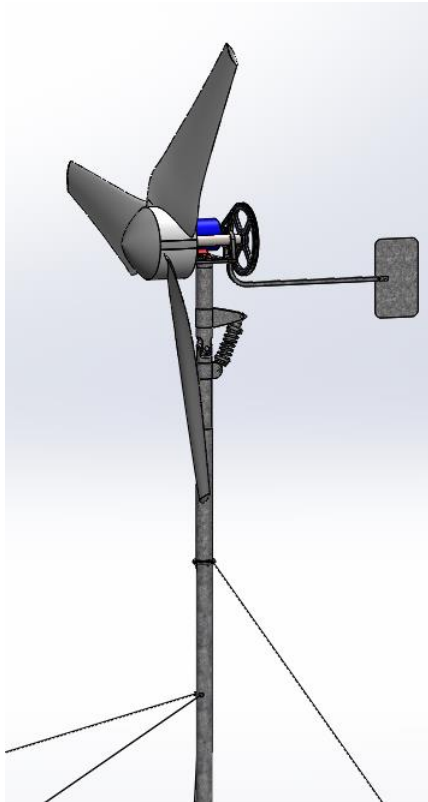
La piattaforma di sostegno è in monoblocco di acciaio galvanizzato. In essa sono stati creati gli alloggiamenti per i cuscinetti a sfera e le asole per il posizionamento dell'alternatore, che fungono anche da tiraggio per la cinghia di trasmissione. La disposizione in orizzontale dell'alternatore è stata effettuata per minimizzare la resistenza all'aria, l'ingombro e la massa del gruppo.

La trasmissione è del tipo a cinghia dentata, con un rapporto di moltiplicazione pari a 5. Infatti una puleggia ruota solidale all'albero primario alla velocità di 300 rpm e l'altra solidale all'albero

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

dell'alternatore, che ruota ad una velocità di 1500 *rpm* per permettere al generatore un eventuale collegamento alla linea elettrica. Per provvedere all'orientamento della turbina al variare della direzione del vento è stato saldato un timone alla piattaforma. Infatti la struttura, che poggia sulla piattaforma, è libera di ruotare attorno all'asse della torre di sostegno.

Nella figura è proposta una vista d'assieme del gruppo realizzato con il software di modellazione CAD SolidWorks®.



5.5 La pala

Esistono infinità di profili alari, progettati con i più svariati criteri e scopi. La trattazione classica della teoria dei profili è quella di Abbot e von Doehoff, mentre la serie più nota di profili alari, e forse la più antica, è quella NACA a 4 cifre seguita dalle più moderne serie NACA a 5 e 6 cifre. NACA era il nome precedente della NASA prima dell'era spaziale, e le cifre si riferiscono a dei fattori geometrici. Ad esempio, nella serie a 4 cifre, la prima cifra indica il valore massimo della linea di curvatura espresso in percentuale della corda; la seconda cifra indica la posizione del punto di curvatura massima, in decimi della corda misurati a partire dal bordo d'attacco; la terza e quarta cifra

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

indicano lo spessore massimo del profilo espresso in una percentuale della lunghezza della corda. Si avrà, ad esempio, un profilo simmetrico con uno spessore pari al 12% della corda e si chiamerà NACA 0012 (perché, essendo privo di curvatura, le due prime cifre sono nulle).

I profili più moderni, sviluppati dalla NASA, dopo la sparizione della NACA, non seguono più la stessa nomenclatura: ad esempio, un profilo sviluppato negli anni '80 si chiama LS(1), ed una sua variante LS(1) MOD. Esistono poi molte serie di profili sviluppati da università o singoli ricercatori. Tipicamente tutte le serie ripotano il nome del soggetto sviluppatore seguito da un numero.

Fino agli anni '80 la selezione del profilo era un aspetto marginale nella progettazione del rotore. Tipicamente venivano utilizzati i profili NACA a 4 cifre perché si disponeva di dati empirici di eliche per elicotteri. La comparazione del funzionamento in modo elica propulsiva serviva in qualche modo per validare i modelli matematici di calcolo delle turbine. La comparazione suddetta non è del tutto valida per le turbine eoliche lavorano con Re molti più bassi delle eliche aeronautiche, ed inoltre vengono installate vicino al suolo, ovvero dove l'aria è sempre "sporca" rispetto alle quote di volo di aerei ed elicotteri. Il risultato della collocazione a bassa quota è lo sporcamento del bordo di attacco per gli insetti che ci vanno a sbattere, così come succede con i parabrezza degli autoveicoli. Inoltre, la sabbia o le polveri grossolane trasportate dal vento graffiano le superfici delle pale. L'aumento di rugosità per questi fattori ambientali comporta una caduta drastica delle prestazioni aerodinamiche del profilo, rappresentate dal coefficiente di finezza f definito come il rapporto tra il coefficiente di portanza C_l e il coefficiente di trascinamento C_d . Si è passato ad utilizzare profili detti "laminari", i quali hanno migliori caratteristiche di stallo ed elevati coefficienti di finezza con bassi angoli di incidenza, ma risultano comunque sensibili al fenomeno di sporcamento del bordo di attacco.

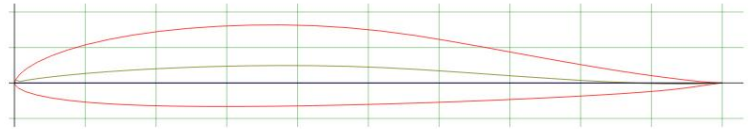
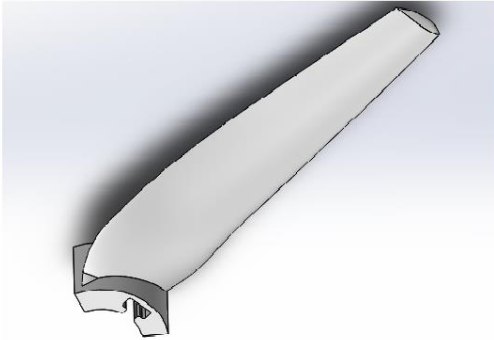
I profili più moderni tollerano meglio la rugosità, ma comunque le loro prestazioni possono calare fino ad un 40% in zone molto polverose, man mano che la pala subisce l'erosione.

Sono state dunque sviluppate delle "famiglie di profili" specifici per la costruzione di turbine eoliche come, ad esempio, i profili NREL ed Eppler che portano ad un aumento complessivo di produttività annua e quindi di efficienza fino al 35 % rispetto a quelli della serie NACA .

Le "famiglie di profili" consistono in genere in 3 o 4 profili geometricamente molto simili, ma con spessore diverso. Il più spesso si utilizza per l'attaccatura della pala, per ragioni strutturali, mentre quello più sottile è ideale per l'estremità della stessa, offre in pratica la massima efficienza aerodinamica.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Il profilo scelto per il progetto è un Eppler 220, essendo un profilo specialmente concepito per operare con bassi Re e adatto per turbine rapide, $\lambda=6\div 8$, alto f e poco sensibile all'aumento di rugosità.



Nelle turbine eoliche, si presenta il problema della limitazione della velocità massima. Infatti, considerando la turbina accoppiata ad un utilizzatore, se aumentasse in maniera indefinita la velocità del vento, si avrebbe un proporzionale aumento del numero di giri e della potenza prodotta (rispettivamente $n \propto V$ e $P \propto V^3$ nel caso di λ costante). Tuttavia anche nel caso comune di un accoppiamento che non assicura la costanza di λ , il problema risiede nel fatto che il dimensionamento degli organi meccanici (alberi, cuscinetti, alternatore) è calcolato in base al numero di giri, alla potenza massima e alla resistenza dei materiali, mentre la velocità dell'aerogeneratore, senza un sistema di controllo, crescerebbe indefinitamente con la velocità del vento.

Quindi, per stabilire a quale velocità interrompere la produzione di energia, si effettua un bilancio energetico che tiene conto del limite superiore di velocità del vento, con benefici in termini di potenza utile prodotta, e costi per un dimensionamento elettrico e meccanico più spinto relativo allo sfruttamento dei venti più intensi.

Sulla base di questi ragionamenti, le norme di progettazione prevedono che si progettino gli organi meccanici per resistere ad una velocità del vento di 40 m/s (calcolo dinamico), mentre per velocità inferiori si considerano solo i calcoli statici.

Detto questo, la velocità alla quale si interrompe la produzione di energia è inferiore a questo valore, usualmente chiamato cut-off speed. Per il controllo della velocità massima esistono vari metodi. I più comuni sono:

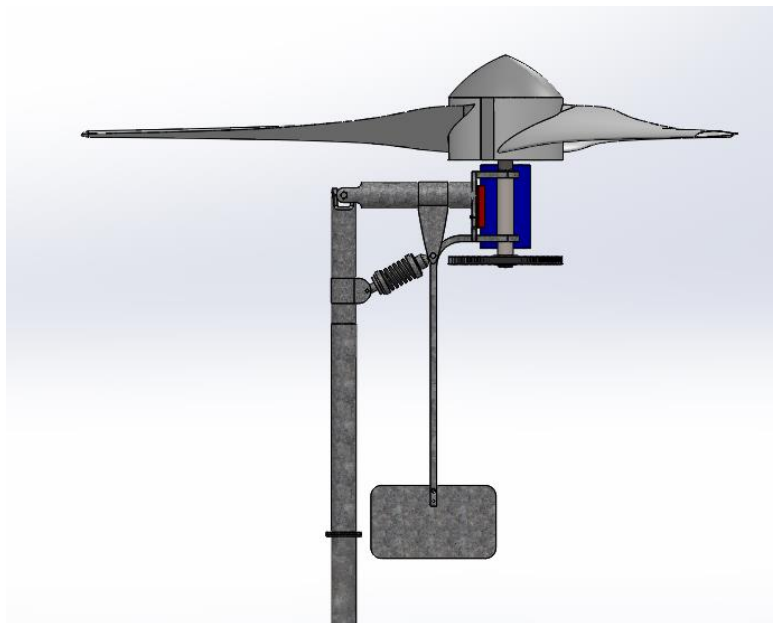
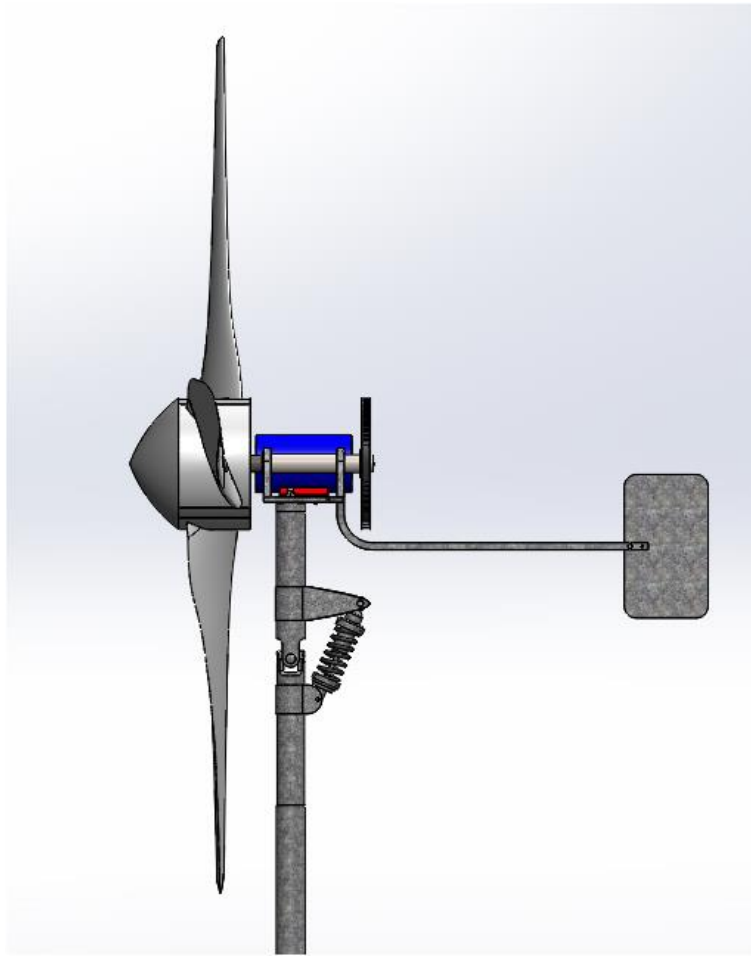
Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

- a) angolo di calettamento delle pale (*pitch control*): in questo caso, interviene un attuatore che dispone le pale “in bandiera”, e quindi λ raggiunge il valore di fuga;
- b) stallo: le pale sono disegnate in modo che al crescere della velocità di rotazione raggiungano il valore di stallo a partire dall'estremità del profilo facendo crollare l'efficienza e la portanza. Per questo tipo di controllo è opportuna una progettazione accurata del profilo palare;
- c) imbardata o inclinazione: la turbina è libera di muoversi attorno ad un asse verticale o orizzontale e al crescere della velocità si dispone quasi parallela al vento.

Oltre a questi sistemi più diffusi, ve ne sono altri basati sugli stessi principi. Queste tipologie di funzionamento richiedono costi elevati, sia in termini energetici per gli attuatori, che in termini di fabbricazione per la precisione nella realizzazione del profilo delle pale, quindi non adottabili per la realizzazione del progetto. Infatti, ricercando semplicità e economicità nella costruzione della macchina, si è adottato un sistema puramente meccanico.

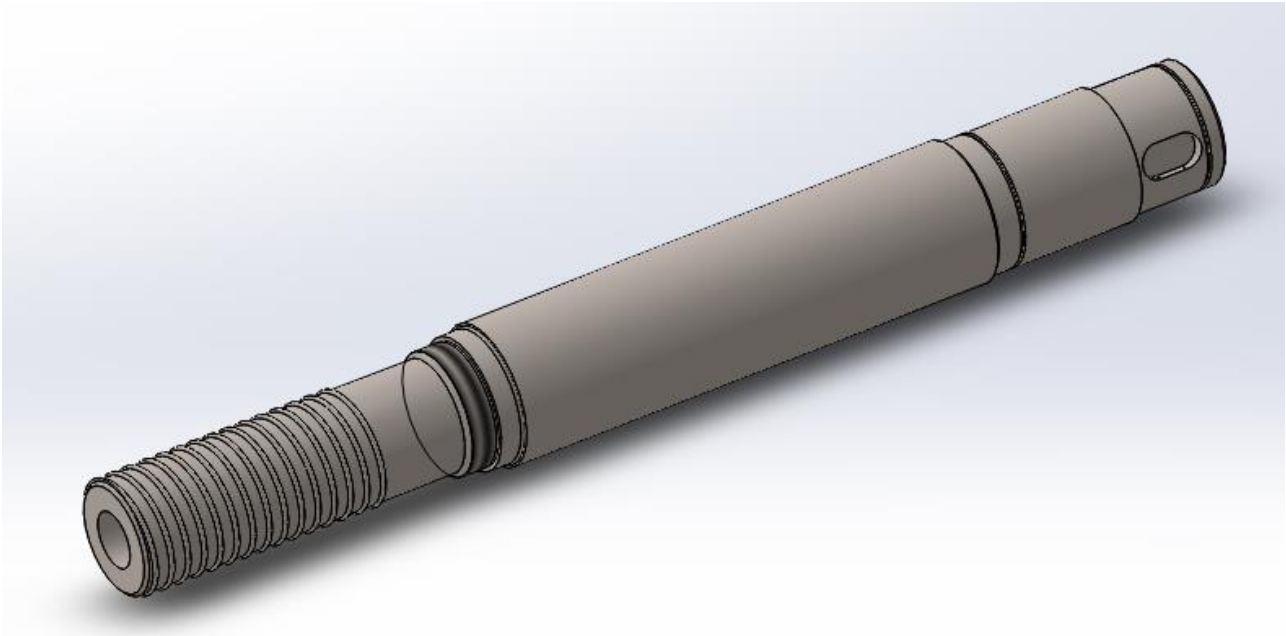
Nello specifico si è utilizzato un dispositivo che al sopraggiunto limite di velocità del vento, da progetto alla velocità di 25 metri al secondo cui corrisponde una velocità angolare ω di rotazione di circa 70 rad/s, consente di far ruotare di 90° il rotore rispetto all'albero che lo sorregge. Questo è stato possibile accoppiando all'albero di sostegno della pala un ammortizzatore da cross regolato in modo che superata la velocità limite del vento, l'ammortizzatore va in compressione in modo da esporre la superficie minore possibile al vento, bloccando di fatto la rotazione, e non appena la velocità del vento diminuisce l'ammortizzatore torna ad espandersi lentamente fino a riportare il rotore in posizione di esercizio. In figura viene esplicitato il funzionamento del meccanismo, che con una giusta calibrazione della molla, consente di avere il risultato desiderato.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile



5.6 L'albero primario

L'albero primario, solidale alla pala, viene posto in rotazione dalla spinta del vento. È necessario fare alcune considerazioni per il suo dimensionamento.



Dalla figura si osserva come nell'albero si ha una prima filettatura che consente di avvitare il rotore all'albero, un secondo tratto filettato per avvitare la ghiera che provvede al bloccaggio assiale dell'anello interno del cuscinetto montato sull'apposito telaio.

All'altra estremità è situata la cava per la linguetta che collega la puleggia all'albero nella trasmissione del moto rotatorio.

Tra le forze che agiscono sulla pala, oltre al momento torcente e alla spinta aerodinamica che sollecita i supporti in direzione assiale, sull'albero in rotazione agisce il *momento giroscopico*, di estrema rilevanza per questo tipo di applicazione.

Questo momento è dovuto al fatto che la pala, essendo una massa rotante, si comporta come un giroscopio. La conseguenza di questo effetto è la nascita di una coppia giroscopica di flessione che si manifesta tutte le volte che la struttura compie una variazione di orientamento intorno ad uno degli assi fondamentali.

Il momento giroscopico

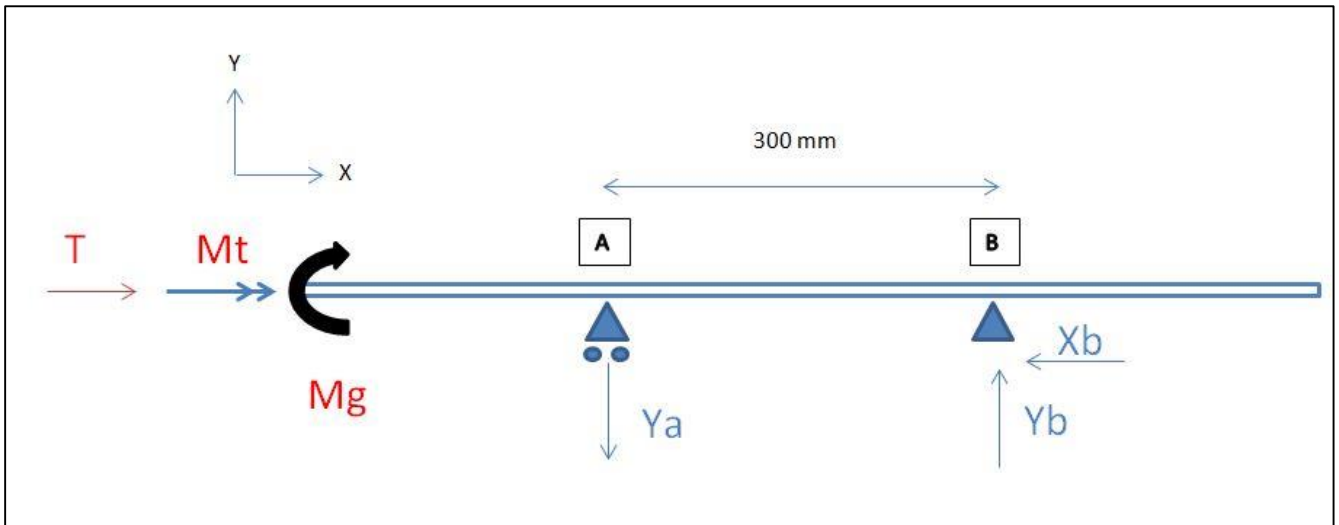
La precessione giroscopica è l'azione risultante manifestata da un rotore posto in rotazione quando interviene una forza esterna ad una delle sue estremità. La forza risultante viene “trascinata” 90° avanti rispetto al punto di applicazione, nella direzione della massa giroscopica. Un'elica (o, nel caso specifico, una pala) in rotazione è paragonabile a un giroscopio, quindi se ad essa venisse applicata una forza che tende a farla uscire dal suo originario piano di rotazione, la forza risultante, agendo a 90° rispetto al punto di applicazione della forza originaria, nel piano di rotazione e nello stesso verso della forza applicata, provocherebbe un momento di beccheggio o imbarcante o una combinazione dei due a seconda del punto di applicazione. Un aeroplano con elica in rotazione, ogni volta che vira, imbarca, cabra o picchia, incontra una resistenza, in quanto ogni volta che una massa rotante (elica) viene forzata a ruotare intorno a un asse perpendicolare o comunque diverso da quello di rotazione stazionaria, tende a opporsi a questo nuovo movimento.

La particolarità del momento giroscopico è di non essere un semplice momento resistente, perché la massa in rotazione produce un momento intorno a un asse diverso, perpendicolare sia a quello di rotazione, che al piano rispetto al quale si manifesta il movimento forzato. L'entità del momento giroscopico è proporzionale al rateo di manovra e al momento della quantità di moto, ovvero il prodotto del momento d'inerzia della massa rotante per la velocità di rotazione. Soprattutto sugli aerei acrobatici i carichi giroscopici possono risultare particolarmente elevati. Nel caso della pala la manovra è rappresentata dalle variazioni di orientamento che si hanno ogni volta che essa si adatta alla direzione del vento. Questo avviene tramite il timone posto in coda alla struttura. Quest'ultima infatti è libera di ruotare attorno all'asse della torre di sostegno fissa.

Dimensionamento dell'albero primario

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Si considerano i carichi agenti sull'albero, secondo lo schema seguente:



M_t è il momento torcente ed è pari a 439 Nm;

T è la spinta aerodinamica di 600 N calcolata in precedenza;

Infine M_g , il *momento giroscopico*.

Per quantificare tale momento M_g , si utilizza la seguente formula semplificata, a vantaggio del coefficiente di sicurezza rispetto ad altre formulazioni alternative:

$$M_g = J \cdot B \cdot \omega$$

J = momento d'inerzia massimo rispetto all'asse di rotazione, calcolato con SolidWorks®, utilizzando l'opzione "Proprietà di massa". Risulta $J = 42 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$;

B = rateo di manovra, ovvero l'unità di misura quantificante la variazione di rotta dalla traiettoria principale. Si assume uguale a $B = \pi/6 \text{ rad/sec}$; ovvero la rotta varia di 30° al secondo;

$$\omega = \text{velocità angolare di rotazione dell'elica}, \omega = 300 \frac{\text{giri}}{\text{min}} = 300 \frac{2\pi}{60} = 31.4 \text{ rad/sec}$$

Risulta:

$$M_g = J \cdot B \cdot \omega = 42 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot 31.4 = 690 \text{ Nm}$$

Tale sollecitazione si manifesta sull'albero dell'elica come un momento flettente il cui piano d'azione e intensità varia di volta in volta a seconda di come si orienta la struttura. Si prende in considerazione la situazione più gravosa, per poter effettuare il calcolo a vantaggio della sicurezza.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Calcolo delle reazioni vincolari

Si calcola la forza Y_a , che per l'equilibrio in direzione radiale della struttura è uguale alla forza Y_b .

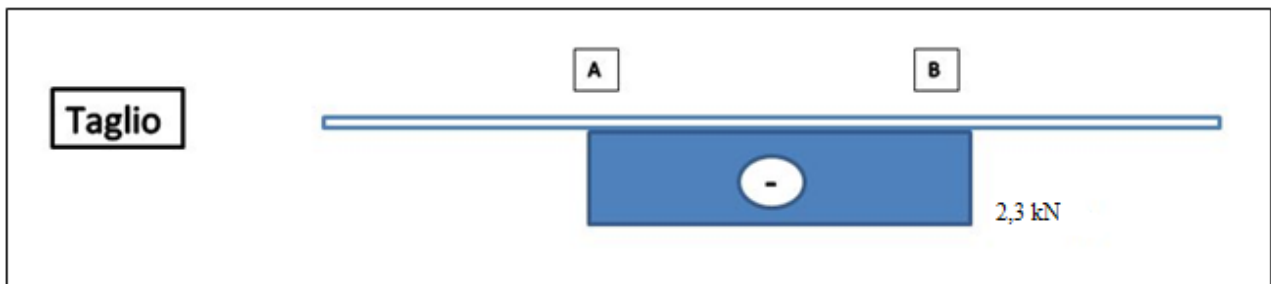
Per cui, per l'equilibrio dei momenti attorno al punto B, risulta:

$$Y_a = Y_b = \frac{M_g}{l} = \frac{M_g}{0.3} = 2.3 \text{ kN}$$

Si ricava in seguito la reazione X_b alla sollecitazione assiale data dalla spinta aerodinamica. Per l'equilibrio in direzione assiale si ha quindi:

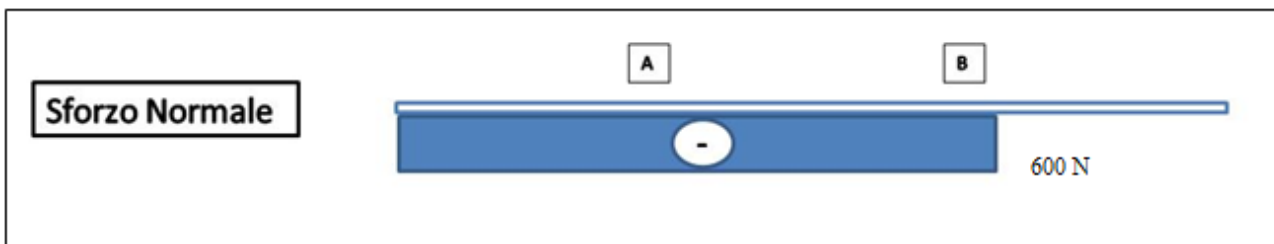
$$X_b = T = 600 \text{ N}$$

Per valutare la sezione maggiormente sollecitata si prendono in considerazione i diagrammi delle sollecitazioni:

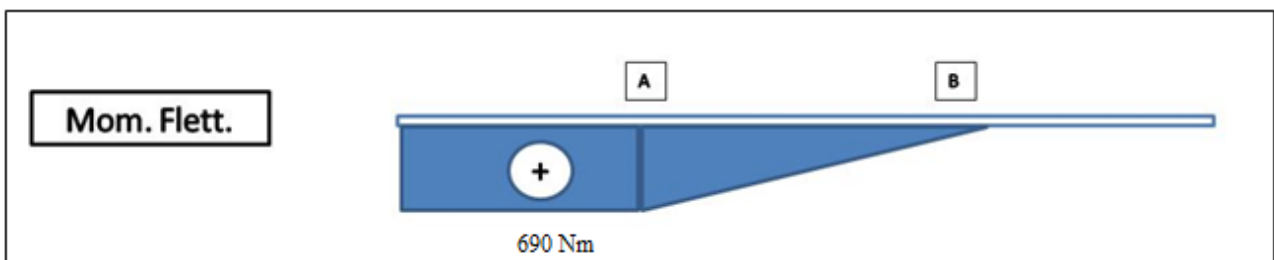


Il tratto sollecitato a taglio è quello compreso tra i due appoggi.

Il valore massimo è di 2,3 kN

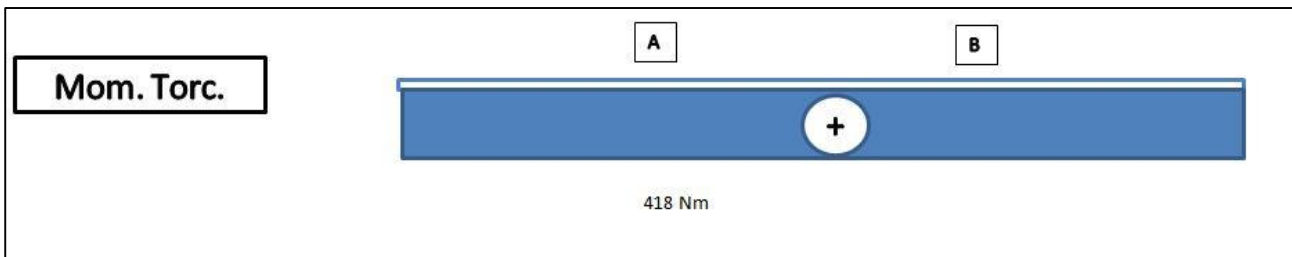


La spinta aerodinamica T provoca una reazione sull'appoggio B, ovvero il cuscinetto bloccato sia sull'anello interno che su quello esterno, pari al suo stesso valore. 600 N



Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Il momento flettente massimo è uguale al momento giroscopico, come calcolato in precedenza pari a 690 Nm.



Questo è il momento torcente generato dalla pala in rotazione. Viene trasmesso alla puleggia posta sull'altra estremità, che a sua volta, tramite trasmissione a cinghia è collegata all'albero dell'alternatore.

Dall'analisi dei grafici, la sezione maggiormente sollecitata risulta la sezione A, sottoposta ai massimi sforzi di tutti e quattro i tipi.

Nel calcolo del diametro si considerano solo il momento torcente e il momento flettente, generato dal momento giroscopico, in quanto le altre sollecitazioni incidono in maniera irrilevante sul pezzo.

Si sceglie di adottare una soluzione con albero cavo, per limitare le masse in gioco e alleggerire, a parità di resistenza la struttura, con rapporto $\beta = D_i/D = 0,5$.

Il materiale utilizzato è un 38NiCrMo4, avente le seguenti caratteristiche:

SIGLA UNI	ANALISI MEDIA		TRATTAMENTO TERMICO °C					CARATTERISTICHE MECCANICHE						
			fucili natura	norma lizzaz.	ricottura	tempra	rinvenimento	stato del materiale	diametro del saggio mm.	R	Rs min.	A min.	KCU min.	HB max.
38 Ni.Cr.Mo.4	C.	0.38						Ricotto	-	-	-	-	-	230
	Ni	0.90				830	560	Bonificato	17+40	95/110	75	14	7.5	-
Cr.	0.80	1100	850	650	860	640	41+100		85/100	65	15	6.5	-	
Mo.	0.20	900	880	700	olio		101+200		80/95	60	15	6.5	-	
Mn.	0.70													
	Si.	0.40												

SIMBOLI E UNITA' DI MISURA (UNI 552)

R kg/mm² Carico unitario massimo di rottura nella prova di trazione (UNI 556) su provetta proporzionale corta Ø 10 mm.

Rs kg/mm² Carico unitario di snervamento nella prova di trazione (UNI 556) su provetta c.s. Nei grafici questo simbolo è sostituito con s.

A Allungamento percentuale dopo rottura nella prova di trazione (UNI 556) su provetta con tratto utile pari a 5 volte il diametro.

KCU kg/mm² Resilienza su provetta intagliata Charpy (UNI 4431).

HB Durezza Brinell mediante misura del diametro dell'impronta (UNI 560).

La tensione di snervamento e quella ammissibile del materiale risultano rispettivamente:

$$\sigma_{flessionale\ critico} = S_y = 60 \frac{kg}{mm^2} = 588.6 \frac{N}{mm^2}$$

$$\sigma_{amm} = \frac{S_y}{2} = 279.3 \frac{N}{mm^2}$$

La formula per il dimensionamento è:

$$\sqrt{\sigma_{flessionale}^2 + 3\tau_{torsionale}^2} \leq \sigma_{amm}$$

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Sostituendo e elevando al quadrato si ottiene:

$$\left(\frac{M_f}{W_b}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M_t}{W_t}\right)^2 = \sigma_{amm}^2$$

Dove $M_f = 690000 \text{ N} \cdot \text{mm}$; $M_t = 418000 \text{ N} \cdot \text{mm}$ e:

$$W_b = \frac{\pi D^3(1 - \beta^4)}{32}; \quad W_t = \frac{\pi D^3(1 - \beta^4)}{16}$$

Dai calcoli si determina il diametro minimo:

$$D_{min} = 32 \text{ mm}$$

Considerando la maggiorazione per la cava per la linguetta, il diametro minimo diventa:

$$D' = 1.3 D_{min} = 40 \text{ mm}$$

Tuttavia, a favore di sicurezza, si utilizza un diametro esterno:

$$D_{est} = 50 \text{ mm} \text{ e quindi } D_i = 20 \text{ mm}.$$

Sostituendo questi valori nella seguente:

$$\left(\frac{\sigma_{flessionale}}{\sigma_{flessionale \text{ critico}}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{torsionale}}{\tau_{torsionale \text{ critico}}}\right)^2 = \frac{1}{n^2}$$

Con:

$$\tau_{torsionale \text{ critico}} = \frac{\sigma_{flessionale \text{ critico}}}{\sqrt{3}} = 161.2 \text{ N/mm}^2$$

Risulta un coefficiente di sicurezza pari a 7, motivabile con le considerazioni fatte nei paragrafi precedenti.

5.7 Scelta dei cuscinetti e montaggio

La guida alla rotazione è affidata a due cuscinetti radiali a sfere, con unità a tenuta d'olio, montati direttamente sulla piattaforma collegata alla torre di sostegno.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Si è scelto un cuscinetto della serie 61815 con diametro interno $\phi = 75 \text{ mm}$. Di seguito si propone la scheda tecnica.

Principal dimensions			Basic load ratings		Speed ratings		Designation
d	D	B	dynamic C	static C ₀	Reference speed	Limiting speed	* SKF Explorer bearing
mm			kN		r/min		-
75	95	10	12,7	14,3	14000	8500	61815

The technical drawing shows two views of the bearing. The left view is a front view with dimensions: B = 10 mm, D = 95 mm, d = 75 mm, and r_{1,2min} = 0,6 mm. The right view is a side view with dimensions: D_{amax} = 91,8 mm, d_{amin} = 78,2 mm, and r_{amax} = 0,6 mm. Below the drawing, the calculation factors are listed: k_r = 0,015 and f₀ = 17.

Per quanto riguarda la verifica, si ricorda che gli appoggi sono sottoposti ad un carico radiale $Y_A = Y_B = 2,3 \text{ kN}$ e da uno assiale $X_A = 600 \text{ N}$, la velocità di rotazione dell'albero $n = 300 \text{ rpm}$ e il rapporto tra il coefficiente di carico dinamico e il carico dinamico equivalente sul cuscinetto, elevato ad un valore $p = 3$ per i cuscinetti a sfere $(C/P)^p = 3,78$.

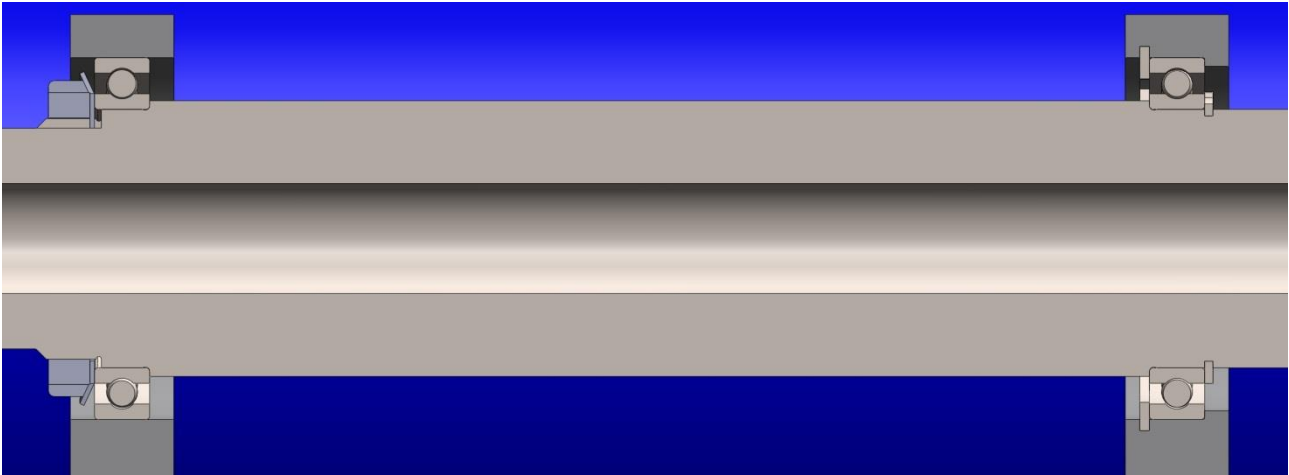
Sostituendo i dati nelle formule per la verifica dei cuscinetti, risulta:

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60 \cdot n} \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^p = 3000 \text{ h}$$

Tempo di funzionamento ampiamente accettabile.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Dopo la verifica si propone, nella figura seguente il particolare del montaggio.



Dalla vista in sezione, si nota come il bloccaggio in direzione assiale sia garantito da un ghiera SKF KM 14 (dotata di rosetta antisvitamento) che si avvita sul tratto filettato dell'albero. Di seguito si propone la scheda tecnica:

Thread size	Principal dimensions			Axial load carrying capacity static	Designations		
	d_3	B	G		Lock nut	Appropriate locking washer	Appropriate spanner
mm	mm	-		kN	-		
70	92	12	M 70x2	118	KM 14	MB 14	HN 14

L'anello interno del cuscinetto dell'appoggio in B è bloccato dall'apposito spallamento dell'albero e da un anello elastico.

L'anello esterno in A è stato lasciato libero assialmente per evitare problemi in caso di sovraccarichi o dilatazioni dovute al riscaldamento dei componenti.

L'anello esterno in B (lato puleggia) è stato bloccato dallo spallamento sul telaio da un lato e da un anello elastico dall'altro.

5.8 Trasmissione a cinghia

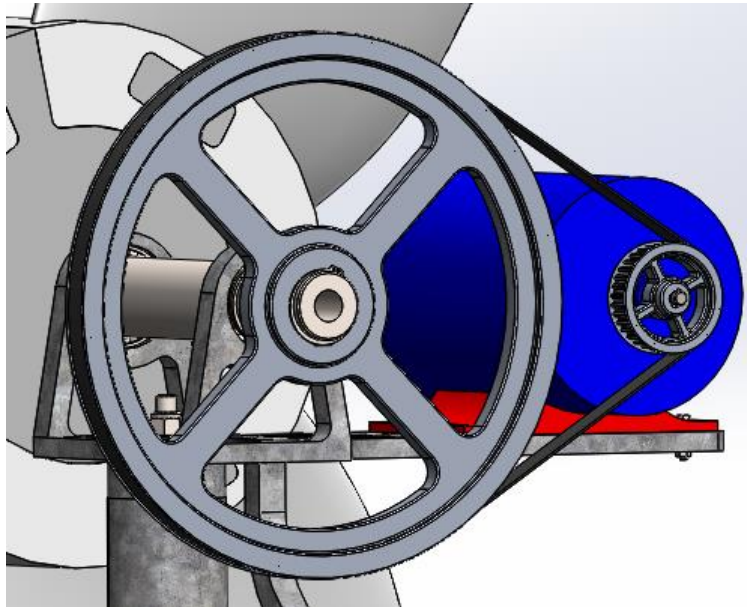
Come detto, la potenza da trasmettere risulta di 6,4 kW. La scelta per il tipo di trasmissione è stata fatta osservando vari fattori:

- economicità della soluzione;
- semplicità di costruzione e montaggio;
- ingombri;
- facilità di manutenzione.

Si è optato quindi per l'utilizzo di una cinghia dentata che rende minimo l'ingombro delle pulegge e minimo l'interasse.

La pala ruota ad una velocità di circa 300 giri/min e l'alternatore deve girare a 1500 giri/min, per poter collegarsi alla rete elettrica, quindi il rapporto di trasmissione risulta:

$$\tau = n_1/n_2 = 300/1500 = 1/5$$



Procedimento di calcolo della trasmissione

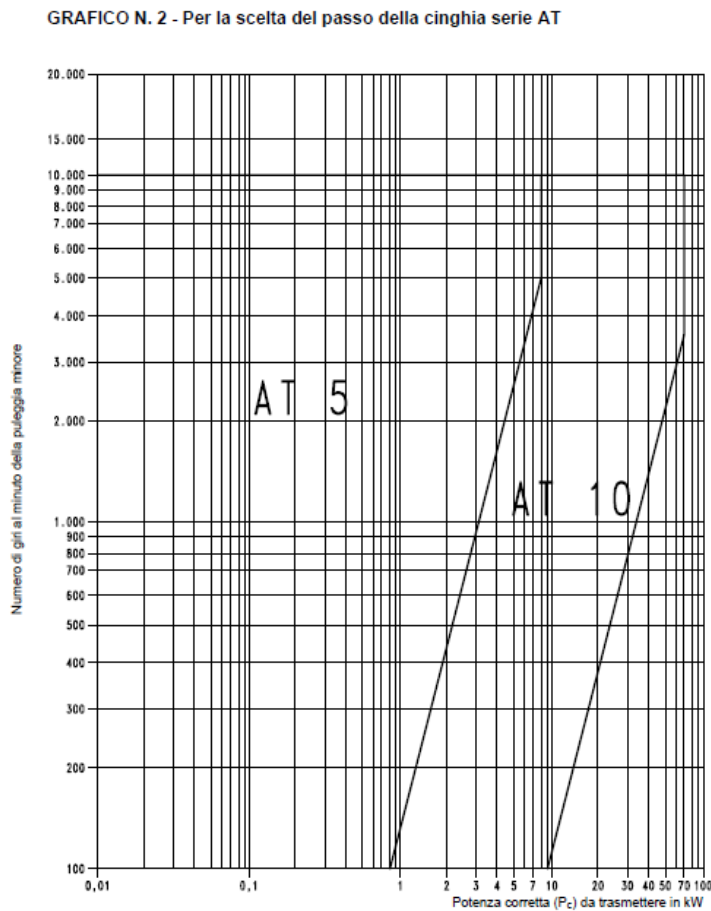
Per il calcolo della trasmissione si è seguito il catalogo Poggi®.

1) *Dati di progetto:*

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

- TIPO DI MOTORE: pala eolica - potenza 6,4 kW - $n_1 = 300$ giri/1'
- UTILIZZATORE: alternatore $n_2 = 1500$ giri/1'
- TIPO DI FUNZIONAMENTO: intermittente
- INGOMBRI: interasse $400 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ - diametro massimo puleggia 600 mm.

2) Passo della cinghia:



Dal grafico si può stabilire quale sia il tipo di cinghia più adatto da impiegare, per $n = 1500$ giri/1' e $P_c = 6,4$ kW la scelta cade su una cinghia tipo AT10 (passo 10 mm).

3) Scelta dei tipi delle pulegge, della cinghia e determinazione dell'interasse:

- a) conoscendo il rapporto $\tau = 1/5$ si determina una serie di pulegge indicate dal rapporto Z/z .

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Compatibilmente con le limitazioni d'ingombro e scartando le pulegge di diametro troppo piccolo, non adatte a trasmettere la sufficiente potenza, si adotta la coppia 34/170, di cui la puleggia con 170 denti come motrice e la puleggia di 34 denti come condotta.

Il diametro primitivo può essere facilmente ricavato per mezzo della relazione:

$$p \cdot z = \pi \cdot D_p$$

Il calcolo dello sviluppo cinghia e dell'interasse effettivo, viene eseguito per mezzo delle seguenti formule:

$$L_t = 2 \cdot I_t + 1,57 \cdot (D_p + d_p) + \frac{(D_p - d_p)^2}{4 \cdot I_t} = 1936,6$$

Dove:

L_t = Lunghezza primitiva teorica della cinghia in mm

I_t = Interasse teorico

D_p = Diametro primitivo della puleggia maggiore

d_p = Diametro primitivo della puleggia minore

L_e = Lunghezza primitiva effettiva della cinghia in mm

I_e = Interasse esatto

Dalle tabelle con le lunghezze standard si trova uno sviluppo di 1940 mm.

Si procede quindi al calcolo dell'interasse esatto:

$$I_e = I_t + \frac{L_t - L_e}{2} = 401,7$$

b) Determinazione dei denti in presa z_t sulla puleggia minore:

$$z_t = \left[0,5 - \frac{4 \cdot p}{79 \cdot I_e} \cdot (Z - z) \right] \cdot z = 11,17$$

4) *Determinazione della prestazione totale:*

Viene determinata rilevando dalle tabelle, in funzione del passo, del numero di denti e del numero di giri della puleggia minore, un valore Pb che moltiplicato per il numero di denti in presa z_t della puleggia minore darà la prestazione totale della cinghia.

prestazioni base (P_b) cinghie AT 10 (passo 10 mm)

TABELLA 7/6 - Potenze trasmesse in kW per ogni centimetro di larghezza cinghia e per ogni dente in presa.

N° denti e codice puleggia	16AT10	18AT10	18AT10	20AT10	22AT10	24AT10	28AT10	28AT10	30AT10	32AT10	38AT10	40AT10	44AT10	48AT10
Diametro esterno mm	46,80	48,06	66,46	81,80	88,16	74,66	80,80	87,26	93,86	100,00	112,76	126,46	138,20	160,86
100	0,014	0,015	0,017	0,018	0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,029	0,033	0,037	0,040	0,044
200	0,025	0,027	0,030	0,033	0,037	0,040	0,043	0,047	0,050	0,054	0,060	0,067	0,074	0,080
300	0,035	0,038	0,042	0,047	0,052	0,057	0,061	0,066	0,071	0,076	0,085	0,094	0,104	0,113
400	0,045	0,048	0,054	0,060	0,066	0,072	0,078	0,084	0,090	0,096	0,108	0,120	0,132	0,144
500	0,054	0,058	0,065	0,072	0,080	0,087	0,094	0,101	0,109	0,116	0,131	0,145	0,160	0,174
600	0,063	0,067	0,076	0,084	0,093	0,101	0,110	0,118	0,127	0,135	0,152	0,169	0,186	0,202
725	0,074	0,079	0,089	0,099	0,108	0,118	0,128	0,138	0,148	0,158	0,177	0,197	0,217	0,236
800	0,080	0,085	0,096	0,107	0,118	0,128	0,139	0,150	0,160	0,171	0,192	0,214	0,235	0,256
900	0,088	0,094	0,106	0,118	0,129	0,141	0,153	0,165	0,176	0,188	0,212	0,235	0,259	0,282
1000	0,096	0,102	0,115	0,128	0,141	0,154	0,167	0,179	0,192	0,205	0,231	0,256	0,282	0,308
1100	0,104	0,111	0,125	0,138	0,152	0,166	0,180	0,194	0,208	0,221	0,249	0,277	0,304	0,332
1200	0,111	0,119	0,134	0,148	0,163	0,178	0,193	0,208	0,223	0,238	0,267	0,297	0,327	0,356
1300	0,119	0,127	0,142	0,158	0,174	0,190	0,206	0,222	0,237	0,253	0,285	0,317	0,348	0,380
1400	0,126	0,134	0,151	0,168	0,185	0,201	0,218	0,235	0,252	0,269	0,302	0,336	0,369	0,403
1425	0,128	0,136	0,153	0,170	0,188	0,204	0,221	0,238	0,255	0,272	0,307	0,341	0,375	0,409
1500	0,133	0,142	0,160	0,177	0,195	0,213	0,231	0,248	0,266	0,284	0,319	0,355	0,390	0,426
1600	0,140	0,149	0,168	0,187	0,205	0,224	0,243	0,261	0,280	0,299	0,336	0,373	0,411	0,448
1700	0,147	0,157	0,176	0,196	0,215	0,235	0,255	0,274	0,294	0,313	0,353	0,392	0,431	0,470
1800	0,154	0,164	0,184	0,205	0,225	0,246	0,266	0,287	0,307	0,328	0,369	0,410	0,451	0,492
1900	0,160	0,171	0,192	0,214	0,235	0,256	0,278	0,299	0,321	0,342	0,385	0,428	0,470	0,513
2000	0,167	0,178	0,200	0,222	0,245	0,267	0,289	0,312	0,334	0,356	0,401	0,445	0,490	0,534
2200	0,180	0,192	0,216	0,240	0,264	0,288	0,312	0,336	0,359	0,383	0,431	0,479	0,527	0,575
2400	0,192	0,205	0,231	0,256	0,282	0,308	0,333	0,359	0,385	0,410	0,461	0,513	0,564	0,615
2600	0,204	0,218	0,245	0,273	0,300	0,327	0,354	0,382	0,409	0,436	0,491	0,545	0,600	0,654
2800	0,216	0,231	0,260	0,289	0,317	0,346	0,375	0,404	0,433	0,462	0,519	0,577	0,635	0,693
2850	0,218	0,234	0,263	0,292	0,322	0,351	0,380	0,409	0,439	0,468	0,526	0,585	0,643	0,702
3000	0,228	0,243	0,274	0,304	0,335	0,365	0,395	0,426	0,456	0,487	0,547	0,608	0,669	0,730
3200	0,240	0,255	0,287	0,319	0,351	0,383	0,415	0,447	0,479	0,511	0,575	0,639	0,703	0,767
3400	0,251	0,267	0,301	0,334	0,368	0,401	0,435	0,468	0,501	0,535	0,602	0,669	0,735	0,802
3600	0,262	0,279	0,314	0,349	0,384	0,419	0,454	0,489	0,523	0,558	0,628	0,698	0,768	0,838
3800	0,272	0,291	0,327	0,363	0,400	0,436	0,472	0,509	0,545	0,581	0,654	0,727	0,799	0,872
4000	0,283	0,302	0,340	0,377	0,415	0,453	0,491	0,528	0,566	0,604	0,679	0,755	0,830	0,906
4200	0,293	0,313	0,352	0,391	0,430	0,470	0,509	0,548	0,587	0,626	0,704	0,783	0,861	0,939
4400	0,304	0,324	0,364	0,405	0,445	0,486	0,526	0,567	0,607	0,648	0,729	0,810	0,891	0,972
4600	0,314	0,335	0,377	0,418	0,460	0,502	0,544	0,586	0,628	0,669	0,753	0,837	0,921	1,004
4800	0,324	0,345	0,388	0,432	0,475	0,518	0,561	0,604	0,647	0,691	0,777	0,863	0,950	1,036
5000	0,333	0,356	0,400	0,445	0,489	0,534	0,578	0,622	0,667	0,711	0,800	0,889	0,978	
5200	0,343	0,366	0,412	0,457	0,503	0,549	0,595	0,640	0,686	0,732	0,823	0,915	1,006	
5400	0,353	0,376	0,423	0,470	0,517	0,564	0,611	0,658	0,705	0,752	0,846	0,940	1,034	
5600	0,362	0,386	0,434	0,483	0,531	0,579	0,627	0,676	0,724	0,772	0,869	0,965	1,062	
5800	0,371	0,396	0,445	0,495	0,544	0,593	0,643	0,693	0,742	0,792	0,890	0,990		
6000	0,380	0,405	0,456	0,507	0,556	0,606	0,659	0,710	0,760	0,811	0,912	1,014		
6500	0,402	0,428	0,482	0,536	0,590	0,643	0,697	0,750	0,804	0,857	0,966			
7000	0,424	0,452	0,509	0,565	0,622	0,678	0,735	0,791	0,848	0,904				
7500	0,445	0,474	0,534	0,593	0,652	0,711	0,771	0,830	0,889	0,949				
8000	0,465	0,496	0,558	0,620	0,682	0,744	0,806	0,868	0,930	0,992				
8500	0,484	0,517	0,581	0,646	0,711	0,775	0,840	0,904	0,969	1,034				
9000	0,504	0,537	0,604	0,671	0,739	0,806	0,873	0,940	1,007					
9500	0,522	0,557	0,627	0,696	0,766	0,835	0,905	0,975						
10000	0,540	0,576	0,648	0,720	0,792	0,864	0,936							
10500	0,557	0,594	0,669	0,743	0,817	0,892								
11000	0,575	0,613	0,690	0,767	0,843	0,920								
11500	0,591	0,631	0,710	0,789	0,867	0,946								
12000	0,608	0,649	0,730	0,811	0,892	0,973								
12500	0,624	0,666	0,749	0,832	0,915	0,998								
13000	0,640	0,683	0,768	0,853	0,939	1,024								
13500	0,655	0,699	0,786	0,873	0,961	1,048								
14000	0,670	0,715	0,804	0,894	0,983	1,072								
14500	0,684	0,730	0,821	0,913	1,004	1,095								
15000	0,699	0,746	0,839	0,932	1,025	1,119								

- Le pulegge ed i numeri di giri corrispondenti a prestazioni comprese in quest'area possono venire impiegati solo se si accetta una riduzione di durata della cinghia.
- Per velocità superiori ai 30 m/sec e cioè comprese in quest'area, è necessario impiegare pulegge speciali non essendo ammesso l'impiego di pulegge di serie.
- Le pulegge comprese in quest'area sono soggette ad ambedue le limitazioni di cui sopra.

Interpolare per le pulegge ed i giri non indicati. Nel calcolo non considerare più di 15 denti in presa.

Con 1500 giri/min, passo 10 mm, z = 34 e 11 denti in presa si ha:

$$P_t = P_b \cdot z_t = 0,301 \cdot 11 = 3,316 \text{ kW}$$

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

5) *Coefficiente di larghezza C_l della cinghia:*

$$C_l = \frac{P_c}{P_t} = 1,93$$

Dove:

P_c = Potenza corretta

P_t = Prestazione totale

C_l = Coeff. larghezza cinghia

6) *Larghezza L_c della cinghia atta a trasmettere la potenza P_c :*

Tipo T5 - T10 - AT5 - AT10	
Coeffic. largh. C_L	Largh. cinghia mm
0,28 + 0,50	6
0,50 + 0,72	8
0,72 + 1,00	10
1,00 + 1,27	12
1,27 + 1,75	16
1,75 + 2,23	20
2,23 + 2,84	25
2,84 + 3,69	32
3,69 + 5,86	50
-	-

Dalla tabella si trova in corrispondenza del valore C_l calcolato al punto 5 la corrispondente larghezza di cinghia $L_c = 20$ mm.

Da dati sperimentali, la velocità periferica risulta ampiamente accettabile:

$$v = \frac{\pi D n_1}{60} = \frac{\pi d n_2}{60} = 8.8 m/s$$

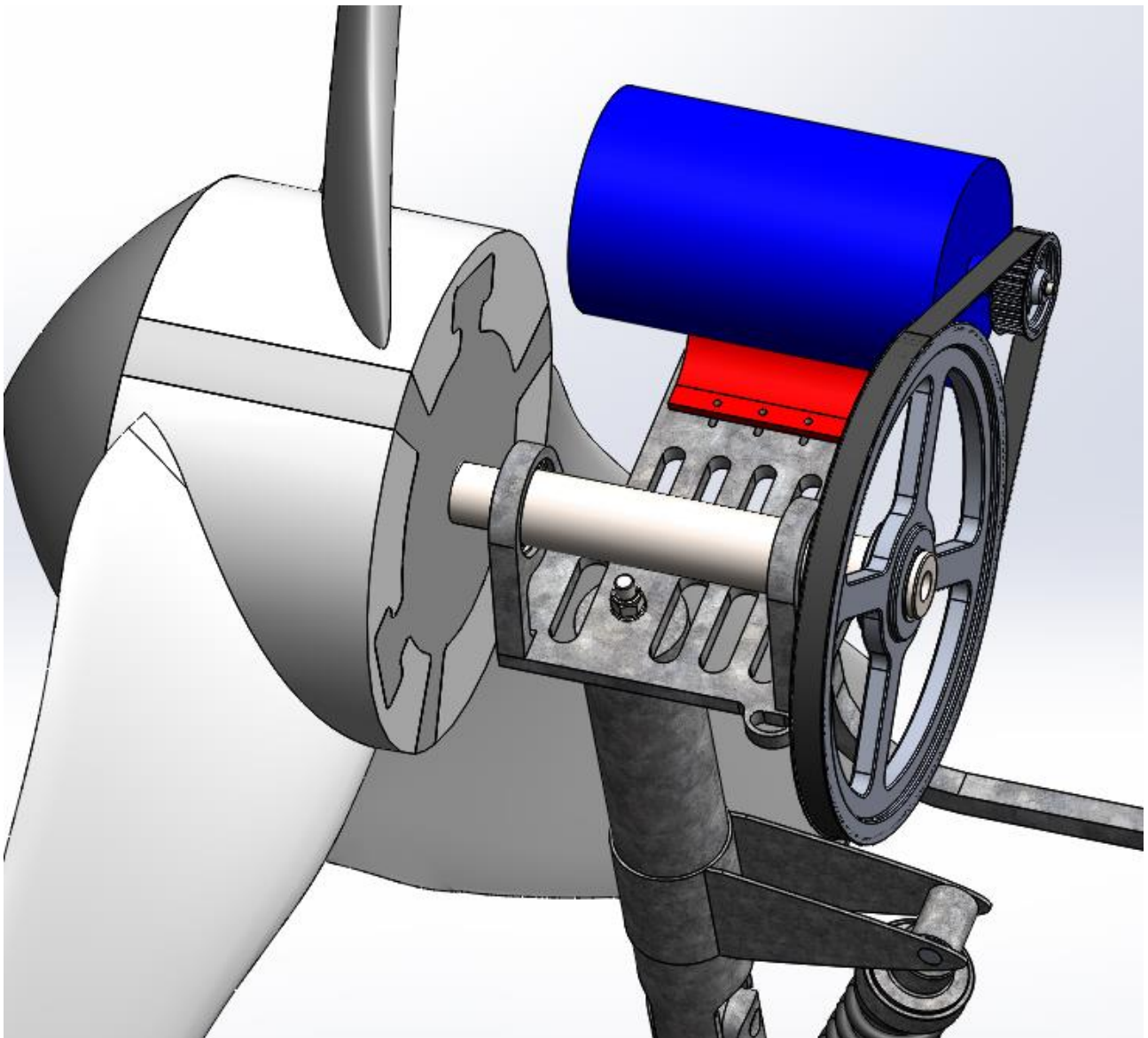
5.9 Piattaforma di collegamento alla torre

Alla piattaforma di sostegno del gruppo (quella che nelle comuni pale rappresenta la navicella orientabile), si è fissato l'alternatore per mezzo di viti passanti. I giri al minuto del rotore sono

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

variabili in quanto dipendono dalla velocità del vento. La frequenza emessa deve essere costante a 50 hertz perciò il rotore è collegato a un inverter. Un inverter è un apparecchio elettronico in grado di convertire una corrente continua in una corrente alternata. Si installa un inverter Aurora PowerOne facilmente reperibile sul mercato con un rendimento di oltre il 96%, garantito a temperature comprese tra i -30 e i +50 gradi fino ad altitudini di 2500 m s.l.m.

Alla piattaforma è saldato il timone che permette l'allineamento della turbina alla variazione della direzione del vento, essendo la piattaforma girevole rispetto alla torre.



Questa rotazione provoca inevitabilmente un effetto di imbardata, detto anche angolo di Yaw.

Questa è la causa del momento giroscopico illustrato nei paragrafi precedenti. Questo fenomeno è accentuato nelle macchine di piccola taglia come la presente, che sono libere di sbandierare sotto

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

l'azione del vento. In quelle di media e grande taglia invece, essendo il moto di orientamento comandato, è più lento e di conseguenza la corrispondente azione giroscopica è trascurabile.

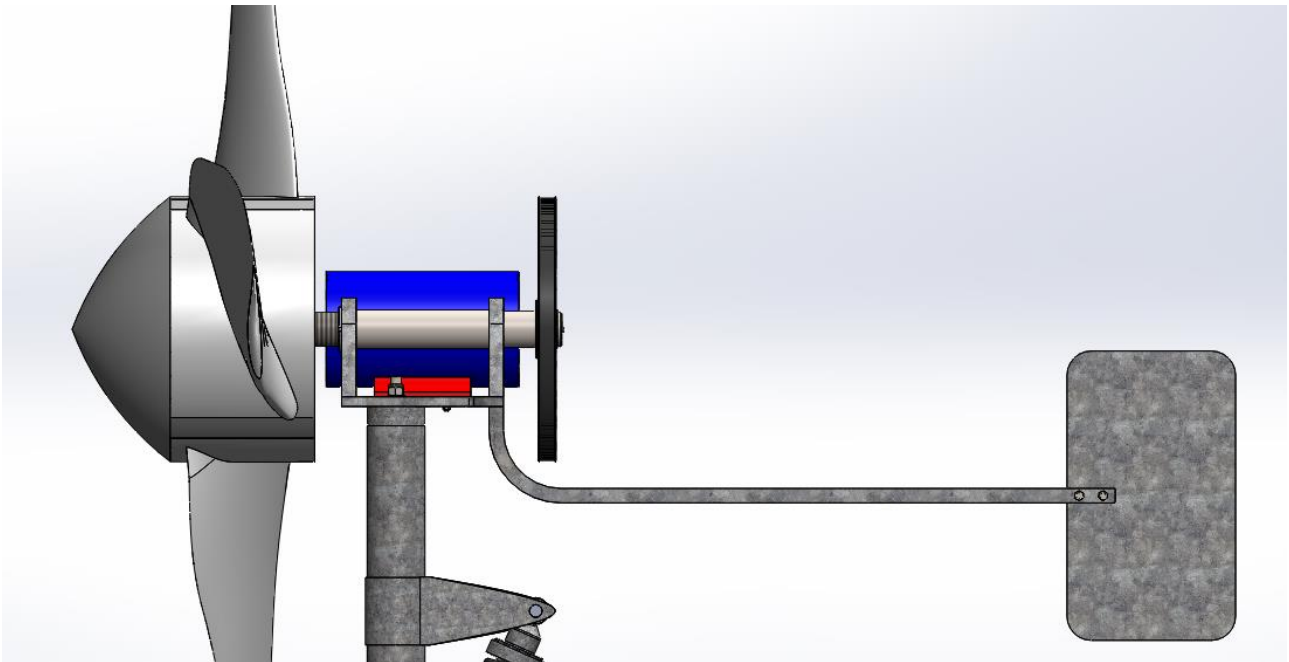
La rotazione della piattaforma attorno alla torre è ottenuta tramite un perno saldato alla torre e un bicchiere con guarnizioni tipo teflon, solidale alla piattaforma.

Per sagomare il timone si è utilizzata la formula che lo lega all'area spazzata dalla pala:

$$S_{timone} = 0.04 A_{spazzata} = 0.04 \frac{\pi d^2}{4} = 0.64 m^2$$

Le asole sono state create per alleggerire la piattaforma, rimanendo nei limiti di sicurezza del materiale.

Nella figura seguente, si nota il particolare del timone, collegato tramite due viti M10 al tubo di sostegno saldato alla piattaforma.



Per impedire alla torre eventuali oscillazioni si utilizzano dei cavetti di acciaio di diametro 2 mm, agganciati ai 4 occhielli della flangia situata tra il martinetto e la torre e ancorati ai 4 piedi del carrello. Per non trasmettere a terra le vibrazioni che si hanno in fase di esercizio della turbina gli organi meccanici vengono “isolati” interponendo tra i collegamenti metallici dei materiali plastici per smorzare le vibrazioni.

Riposta la torre in posizione di riposo, ovvero appoggiata sull'apposita staffa e agganciata la fune ai 2 supporti, i tiranti vengono manualmente rimossi e posti nell'apposito contenitore.

5.10 Stabilizzatori

Per il dimensionamento degli stabilizzatori serve dapprima conoscere forze e momenti flettenti in gioco. Per calcolarli si è utilizzata un'applicazione di SolidWorks®, ovvero Flow Simulation 2013, software che risulta molto pratico e rapido qualora si voglia far un conto di massima del progetto. Infatti questo programma, dato un sistema di coordinate, permette di calcolare forze e momenti in gioco dovute alla pressione creata dal vento. Si è eseguito il calcolo nella situazione più sfavorevole, ossia con pala in bandiera bloccata verso l'alto, con ventosità in direzione perpendicolare alla pala pari a 300 km/h, per ottenere un elevato coefficiente di sicurezza.

Per comodità di calcolo si è posto il sistema di coordinate alla base della torre di sostegno della pala, in questo modo si è potuto facilmente calcolare la forza e il momento ribaltante. I risultati sono esposti in figura, dove si può notare che il momento flettente massimo risulta di circa 11000000 Nmm.

Assieme finale tesi.SLDASM [Ribaltamento [Default]]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
GG Force 1	[N]	5885,218477	5868,573124	5853,05089	5885,218477	100	Yes	32,16758633	338,3808869
GG Force (X) 1	[N]	5827,679108	5812,397693	5798,356249	5827,679108	100	Yes	28,7109808	338,8404427
GG Force (Y) 1	[N]	-414,2151203	-414,2027959	-419,0895555	-410,0416872	100	Yes	9,04786831	39,86766343
GG Force (Z) 1	[N]	-708,7866833	-696,108136	-708,7866833	-679,4361487	100	Yes	29,3505346	34,50204007
GG Torque (X) 1	[N*m]	-2522,210818	-2501,183039	-2530,431976	-2477,717391	100	Yes	52,71458476	57,67259563
GG Torque (Y) 1	[N*m]	-6627,802104	-6591,748434	-6627,802104	-6561,269299	100	Yes	38,2546489	556,017326
GG Torque (Z) 1	[N*m]	-11153,06759	-11162,69816	-11184,90906	-11133,46837	100	Yes	37,31857425	94,06035545

Iterations: 183

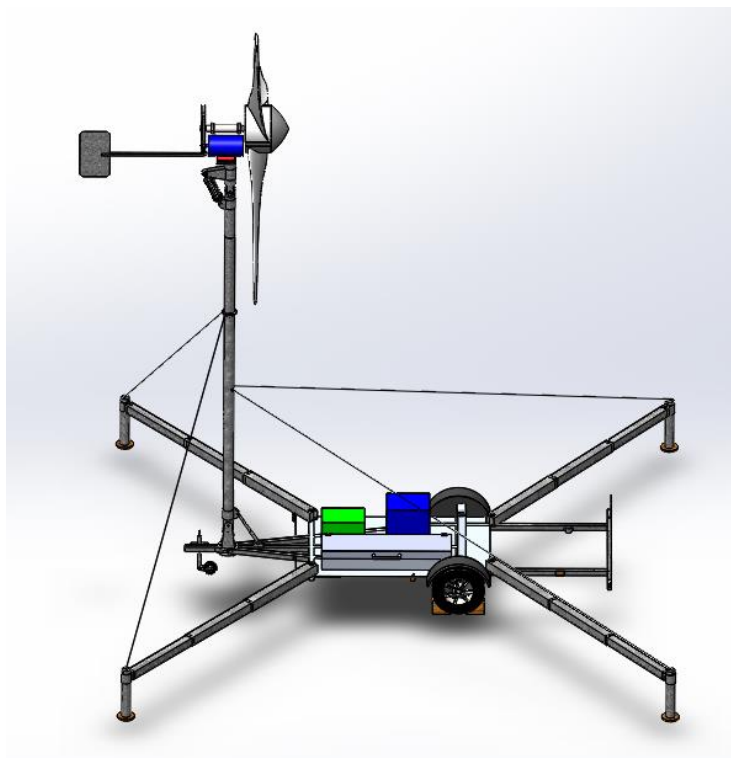
Analysis interval: 28

Per il sostegno del carrello e per evitare il ribaltamento in caso di ventosità elevate (fino a 300 km/h), si utilizzano 4 stabilizzatori disposti come in figura che permettono di richiudersi nello spazio necessario in fase di trasporto e di allungarsi fino alla lunghezza desiderata di 6300mm nella messa in funzione. Questa lunghezza è stata determinata considerando la forza peso e il momento in gioco ricavati in precedenza tramite analisi CFD.

Infatti considerando la struttura come una trave appoggiata-appoggiata con il momento flettente applicato nel centro, si calcola facilmente la lunghezza minima necessaria per sostenere il carrello. Supponendo che il peso totale P del carrello, calcolato con la funzione proprietà di massa di SolidWorks®, si distribuisca in maniera equa fra gli appoggi, si ha:

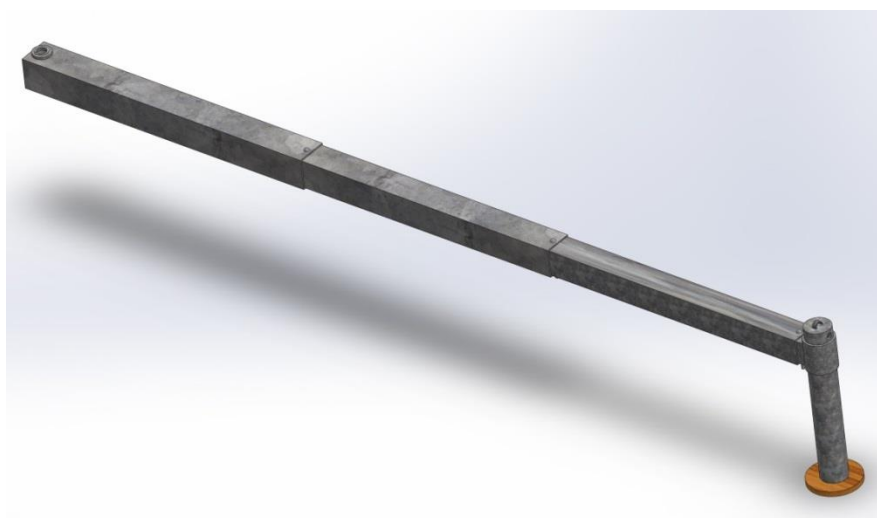
$$L = \frac{M_{flettente}}{P/4} = \frac{11000000 \text{ Nmm}}{7000/4 \text{ N}} \approx 6300 \text{ mm}$$

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile



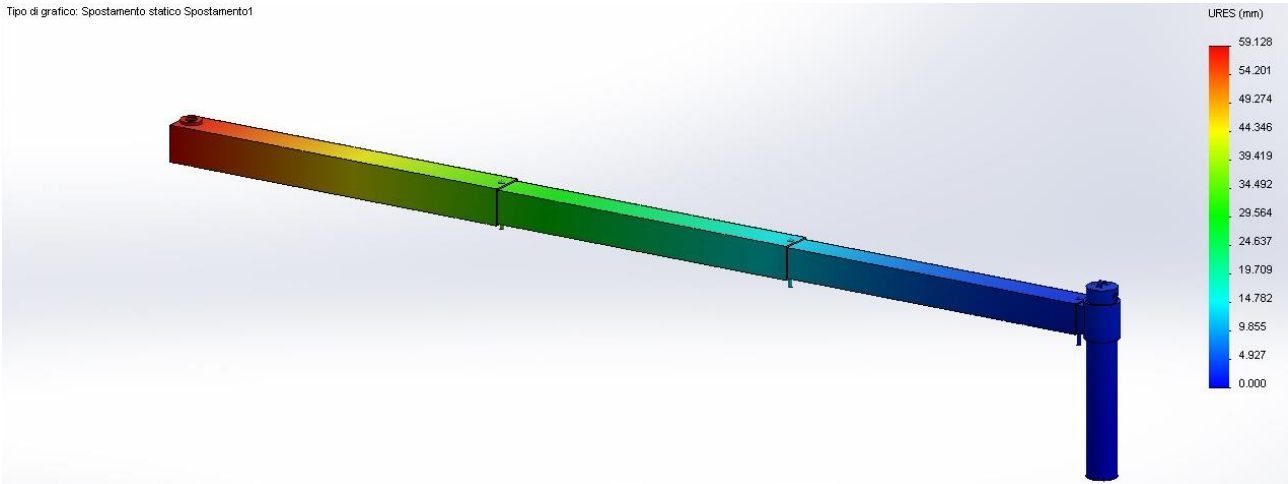
Il carrello, pesando poco più di 700 kg, soddisfa il dimensionamento richiesto per evitare il ribaltamento.

Gli stabilizzatori sono realizzati con acciaio galvanizzato che garantisce la sufficiente rigidezza e una buona resistenza all'usura degli agenti atmosferici, mantenendo l'economicità della soluzione. Gli stabilizzatori, di sezione quadrata, si ritraggono in fase di chiusura con meccanismo telescopico formato da 3 elementi, mentre in posizione estesa vengono bloccati tramite perni. I pali di sostegno dei 4 bracci sono dotati di filettatura per permettere il sollevamento del carrello con un semplice movimento di rotazione del sostegno stesso, fino a 50/60 mm da terra. Il bloccaggio al telaio è ottenuto per mezzo di rosetta e anello seeger serie pesante per supportare il peso del carrello.

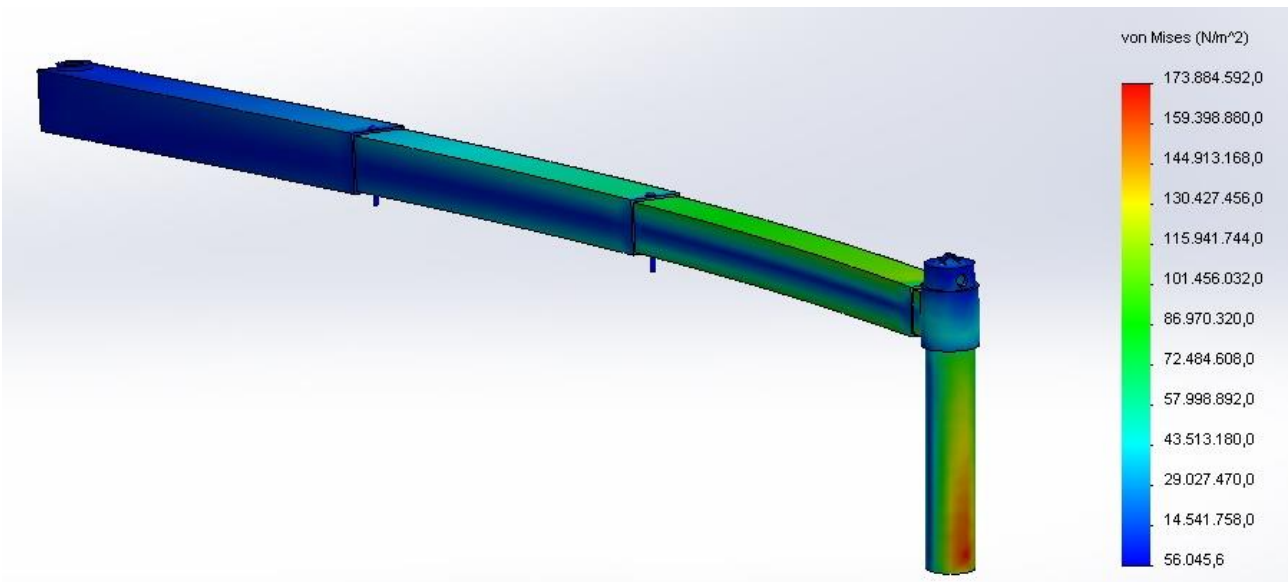


Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Di seguito si riporta la verifica a sollecitazione secondo Von Mises e lo spostamento verticale calcolato tramite SolidWorks Simulation®. Le forze che agiscono su ogni supporto sono la forza peso e di compressione, con valori rispettivamente di 2000 N e 6000 N, approssimati per eccesso. Rispetto alla lunghezza dello stabilizzatore aperto, si può notare che lo spostamento massimo rimane al di sotto del 20 %, limite elastico del materiale, con un valore dello spostamento di circa 60 mm contro una lunghezza di 3345mm.



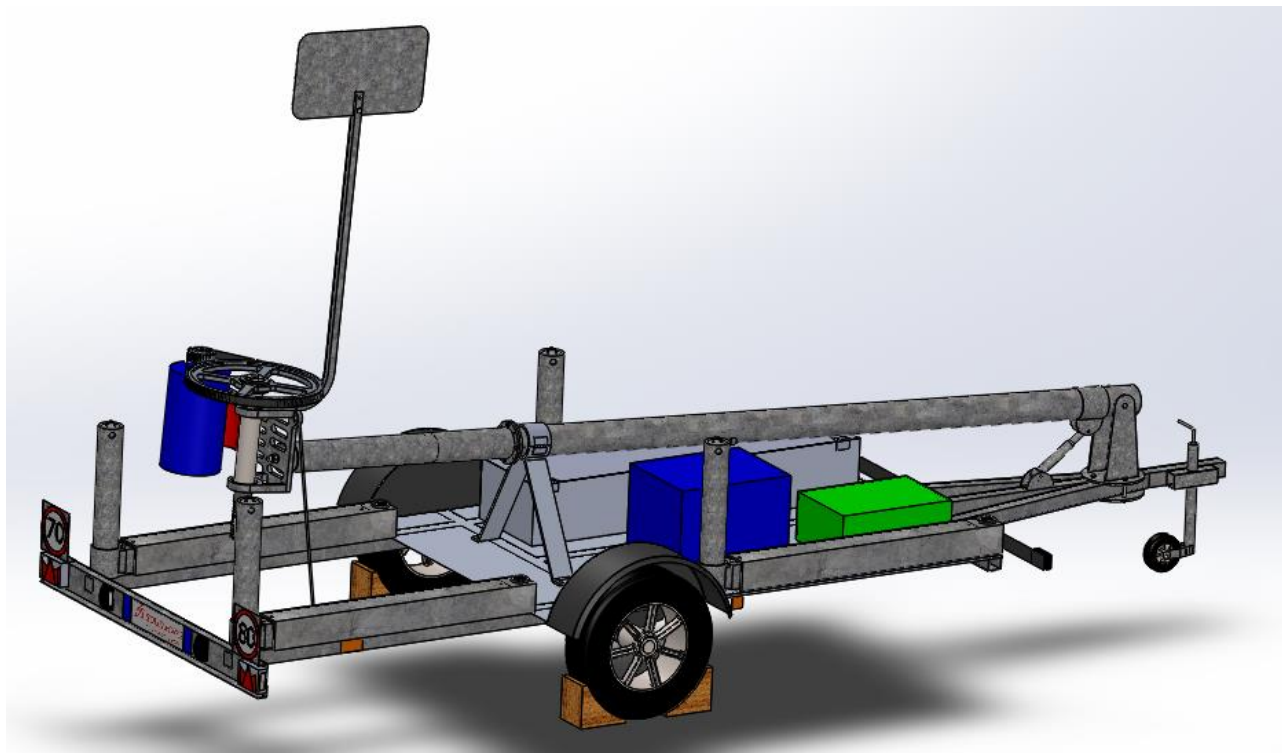
La sollecitazione massima, come mostrato in figura, risulta di 174 N/mm^2 , minore del valore di snervamento del materiale, acciaio galvanizzato, pari a 203 N/mm^2 .



Lo stabilizzatore risulta quindi resistente e pesando 70 kg sufficientemente leggero per permettere al carrello di rimanere entro i 750 kg di peso.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Lo stabilizzatore, posizionato in fase di trasporto, come appare nella figura seguente, risulta estremamente compatta e maneggevole. Per evitarne l'apertura durante il trasporto, si blocca la rotazione tramite perno.



5.11 Conversione meccanica-elettrica

La seconda conversione di energia per importanza che avviene nelle macchine eoliche è quella da energia meccanica ad energia elettrica.

Il meccanismo principale è il generatore che sfrutta i principi dell'induzione elettromagnetica. Si vuole ricordarne la base scientifica, in particolare il principio secondo cui muovendo un filo elettrico all'interno di un campo elettromagnetico si genera nel filo una tensione, ovvero una corrente elettrica sfruttabile da un utilizzatore. Il generatore è perciò un insieme di apparati che rende possibile la creazione del campo elettromagnetico e grazie al movimento di conduttori all'interno di questo campo in modo si crea tensione e corrente, ossia energia elettrica.

Le macchine elettriche a cui appartengono i generatori e i motori possono creare e utilizzare energia in forme diverse:

- corrente alternata;

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

- corrente continua;
- corrente a impulsi;
- corrente trifase.

Solitamente negli impianti eolici si produce corrente continua per due motivi: il vento ha una velocità troppo variabile per mantenere costante il numero di giri del rotore, quindi la corrente alternata avrebbe una frequenza variabile e mai uguale a quella della rete; le batterie per l'immagazzinamento dell'energia prodotta in eccesso rispetto al consumo, utilizzano soltanto la corrente continua. Per questo motivo nel progetto in questione, come anticipato, si è scelto di collegare alle batterie un inverter che permette l'allacciamento alla linea elettrica, che è in corrente alternata.

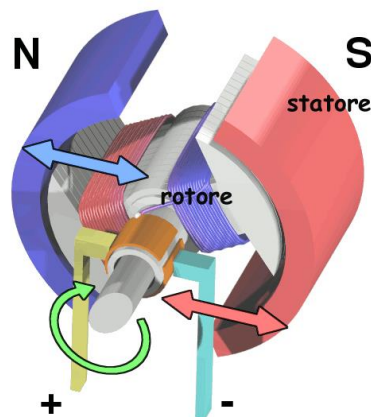
Generatore di corrente

Il generatore di corrente è il cuore della turbina eolica e condiziona gran parte del lavoro di progettazione. È costituito da una macchina in cui la potenza in ingresso è di tipo meccanico e quella in uscita è di tipo elettrico.

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, contenere parte degli avvolgimenti indotti o induttori installati in apposite cave. Generalmente ha le dimensioni maggiori del rotore e conferisce al motore la geometria che lo caratterizza.

Il rotore, detto anche indotto, ha il compito di ruotare. Grazie all'interazione tra i due elementi 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:

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

- motori a 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 collegando un altro motore all'albero (per es. motore endotermico). Caratteristica che gli conferisce la capacità di agire da freno o di recuperare dell'energia nei mezzi ibridi; per agire da freno, nel modo più semplice, si collega un resistore alle spazzole, che permette di dissipare in calore l'energia meccanica trasmessa all'albero. Riassumendo si può affermare che il motore a corrente continua ha le caratteristiche necessarie per il progetto in questione: può creare energia funzionando da dinamo e dissipare energia come freno.

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

Motore a corrente continua a spazzole

Il classico motore a corrente continua ha una parte rotante detta rotore o armatura e una parte fissa che genera un campo magnetico 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.

Essendo il commutatore a spazzole indispensabile, si devono prendere in considerazione alcuni inconvenienti:

- le spazzole devono essere sostituite periodicamente;
- le spazzole pongono un limite alla massima velocità di rotazione: maggiore è la velocità, più forte è la pressione che occorre 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.

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

Queste scintille comportano disturbi elettrici irradiati nell'ambiente circostante e trasmessi al generatore di tensione che alimenta il motore. Questi disturbi, in determinati settori di impiego, possono causare problemi di compatibilità elettromagnetica da attenuare con l'utilizzo di filtri.

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

- quando il motore è di grossa potenza aumenta il calore da smaltire, 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 aumentando il momento d'inerzia: quando il motore deve rispondere con rapidità e precisione, come avviene nelle automazioni industriali e nella robotica, il controllo diventa più complesso.

Motore brushless

Non ha bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero motore per funzionare. La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti, 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. Dato che il controllore deve conoscere la posizione del rotore rispetto allo statore, esso viene collegato a un sensore a effetto Hall, come il Pick-up, o a un più preciso resolver.

Vantaggi:

- il primo vantaggio riguarda la durata attesa del motore, dato che le spazzole sono il "punto debole" di un motore a 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 può erogare. In termini di efficienza, i motori brushless sviluppano molto meno calore di un equivalente motore a 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", ovvero senza alettature esterne di raffreddamento;

Cap.5 – studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile

- 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, che utilizzano un potenziometro o un reostato, estremamente economici, la regolazione della velocità viene effettuata elettronicamente da un controller. Dispositivo elettronico complesso, fornito dal costruttore del motore o da terze parti.

6

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

6.1 Considerazioni sul progetto

L'aerogeneratore dello studio presentato sviluppa una potenza di circa 10 kW con il rotore ad una velocità di 300 rpm, in condizioni di ventosità media di 11 m/s.

Può essere messo in funzione in tempi ridotti, da parte di qualsiasi utente e con il carrello si ha la possibilità di trasporto dell'impianto nel luogo desiderato, senza particolari autorizzazioni.

Grazie a semplici meccanismi di basso costo l'aerogeneratore si posiziona sempre in direzione del vento garantendo la massima produzione di energia. In caso di ventosità elevata il semplice sistema a molla permette la messa in bandiera, per evitare guasti.

I vincoli progettuali sono condizionati dalle dimensioni del carrello e della torre su cui è montata la pala. In particolare, dovendo realizzare un carrello appendice da omologare per il trasporto con una comune patente B, si è contenuto il diametro del rotore, in 6,4 metri.

L'impianto ha una notevole semplicità costruttiva e d'installazione, con un numero limitato di parti meccaniche in movimento per ridurre le probabilità di guasto e gli interventi di manutenzione. Tutti i componenti sono montati ad un'altezza non troppo elevata che permette l'intervento senza l'ausilio di gru o ponteggi.

Alla base della filosofia di progettazione utilizzata vi è l'obiettivo di permettere in un futuro, una diffusione di questo tipo di impianti anche in campo militare, protezione civile o turistico. Per questo motivo nella progettazione, oltre all'efficienza, si è tenuto strettamente conto di fattori quali ingombri e costi.

Soltanto con una logica di abbattimento dei costi è pensabile una diffusione su larga scala di questi microgeneratori. Queste considerazioni hanno guidato l'intero progetto. Sono evidenti nella scelta della realizzazione della pala per mezzo di lamine sovrapposte, il relativo sistema a molla per la regolazione dell'incidenza con la messa in bandiera in condizioni di vento troppo intenso e il sistema di controllo dell'orientamento cui provvede esclusivamente il timone.

Cap.6 – Conclusioni e sviluppi futuri

Ad integrazione del presente impianto, vi sono ulteriori idee che potrebbero essere sviluppate in futuro:

- integrare il sistema con un gruppo di batterie per l'accumulo dell'energia;
- predisporre la possibilità di immettere nella rete elettrica l'energia prodotta, sfruttando gli incentivi stanziati, in modo da ridurre l'investimento;
- integrare la produzione di energia elettrica con l'installazione di pannelli fotovoltaici per sfruttare la risorsa solare;
- adattare al carrello un sistema antifurto per preservare l'oggetto e renderlo più sicuro.

Un impianto come quello presentato nell'elaborato, non essendo ancorato al suolo, ma montato su di un carrello appendice posto su ruote, non ha bisogno di autorizzazioni da parte di enti specializzati nel settore.

Questa tipologia di impianto è consigliata nei casi in cui sia sufficiente un fabbisogno di energia da utilizzare in situazioni di emergenza o allacciare in parallelo al sistema principale di alimentazione elettrica, mantenendo accettabile l'impatto ambientale.

Aspetto da non sottovalutare è la possibilità di installare un impianto capace di produrre circa 10 kW, con un investimento non troppo oneroso.

6.2 Considerazioni finali

Nel presente studio si è messo in evidenza come l'energia eolica possa rappresentare una risorsa versatile e soprattutto pulita nel settore della produzione di energia.

È bene chiarire che, vista la spropositata richiesta in termini energetici del mondo occidentale, questa non può certo essere l'unica risposta al dilemma che contrappone, da un lato la richiesta di energia e dall'altro la necessità di ridurre l'inquinamento atmosferico.

In quest'ottica, i seppur comprensibili dibattiti che coinvolgono anche l'opinione pubblica sul fatto che l'energia eolica sia o meno a impatto zero, sembrano alquanto strumentali.

Infatti, se da un lato è comprensibile il pensiero di chi sostiene che talora possano danneggiare l'armonia dell'ambiente, oltre a interferire con l'equilibrio della fauna di alcuni paesaggi, dall'altro si può affermare che questo tipo di impatto è accettabile se paragonato all'inquinamento atmosferico provocato dalle tecnologie di produzione di energia da combustibili fossili.

Come si è specificato precedentemente, non vi è l'illusione di poter soddisfare il fabbisogno energetico interamente con energia "pulita", ma sarebbe opportuno quantomeno incentivare la

Cap.6 – Conclusioni e sviluppi futuri

diffusione di sistemi come questo presentato, che nelle miniproduzioni di energia risulterebbero efficaci.

Un ulteriore motivo di dibattito è la produzione di inquinamento acustico di questo tipo di impianti. Alcuni studiosi hanno indicato il rumore generato dal rotore come un forte inconveniente. A questo proposito si sono imposte per legge delle limitazioni da osservare sulla distanza minima di posizionamento tra la pala eolica e le abitazioni, per far sì che tale rumore venga coperto da quello prodotto dal vento stesso.

Negli Stati Uniti le turbine multipala, al pari dei mulini a vento olandesi, vengono installate senza considerare l'impatto ambientale provocato, sono diventate addirittura un'icona di bellezza.

In Italia come nel resto dell'Europa gli aerogeneratori vengono discussi per il problema dell'impatto visivo; è indubbio il fatto che non possa essere sottovalutato il contesto in cui inserire tali pale eoliche, tuttavia per sfruttare al meglio l'energia pulita, è necessario rintracciare un accordo congiunto tra chi sostiene questi tipi di iniziative e chi tenta di bloccarle.

Ringraziamenti

Ed eccoci finalmente ai ringraziamenti, che si fanno sempre in allegria, visto che significano la fine di un percorso e il raggiungimento di un traguardo importante. È stato un percorso veramente lungo e pieno di ostacoli da superare, inimmaginabili all'inizio dell'avventura, ma che mi hanno fatto maturare come uomo. Sono passati molti anni da quel primo giorno di "scuola", troppi, spero di ricordarmi di ringraziare tutti, senza fare nomi, perché siete davvero tanti e tutti importanti.

Ringrazio principalmente la mia famiglia che ha permesso di realizzare questo sogno. Ringrazio mia ragazza che mi ha sempre sostenuto e incitato nei momenti di crisi e gioito insieme a me per i miei successi, che mi ha ascoltato ore e ore con pazienza mentre ripeteva durante la preparazione agli esami.

Tutti i miei parenti, anche quelli che purtroppo non ci sono più, che non vedevano l'ora di festeggiare con me.

Un ringraziamento sentito al professore Piancastelli, per la sua professionalità e per la sua immensa disponibilità nel venire incontro agli studenti, condita da una spontanea allegria e voglia di fare sempre battute.

Bibliografia

- [1] Robert C. Juvinall, Kurt M. Marshek, *Fundamentals of machine component design*, Hoepli Milano, 2005;
- [2] J. Shigley, R. G. Budynas, J. K. Nisbett, *Progetto e costruzioni di machine*, McGraw-Hill Milano, 2005;
- [3] G. Manfè, R. Pozza, G. Scarato, *Disegno meccanico*, Principato Milano, 1992;
- [4] M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto, *Sistemi energetici Complementi 2*, Pitagora Editrice Bologna, 2008;
- [5] A. Caffarelli, G. de Simone, M. Stizza, A. d'Amato, V. Vergelli, *Sistemi eolici: progettazione e valutazione economica. Impianti micro, mini, multimegawatt*, Maggioli Editore, 2009;
- [6] G. Pirini, *Tesi di laurea: Sviluppo di un aerogeneratore eolico monopala trasportabile su un carrello*, Università di Bologna, 2013;
- [7] V. Panzetta, *Tesi di laurea: Studio ed ottimizzazione di un microgeneratore monopala ad incidenza variabile*, Università di Bologna, 2012;
- [8] Catalogo Poggi, *Cinghie e pulegge dentate passo metrico*, Poggi, 2001;
- [9] Desiré Le Gouriers, *Energia eolica, teoria, progetto e calcolo pratico degli impianti*, Ed. Masson, 1985;
- [10] 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;
- [11] Gopal B. Reddy, Adviser James H. Strickland, *The darrieus wind turbine: an analytical performance study*, Dec. 1975 Texas Tech University, Lubbock, TX 79409, USA;
- [12] Sito web: Wikipedia.