

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea Triennale in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in DISEGNO TECNICO ASSISTITO DAL CALCOLATORE

***STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DI UN
GENERATORE EOLICO
CARRELLABILE***

CANDIDATO
LORENZO MAZZA

RELATORE
LUCA PIANCASTELLI

Anno Accademico 2014/2015
Sessione III

INDICE

<i>Premessa</i>	<i>pag.</i>	3
1 Le fonti rinnovabili		
Introduzione	pag.	3
1.1 energia solare	pag.	5
1.2 energia eolica	pag.	8
1.3 energia idroelettrica	pag.	10
1.4 energia geotermica	pag.	10
1.5 energia da biomasse	pag.	12
1.6 energia marina	pag.	12
2 Turbina eolica		
2.1 Generatore ad asse orizzontale	pag.	14
2.2 Generatore ad asse verticale	pag.	21
2.3 Minieolico e Microeolico	pag.	22
3 Modello matematico		
3.1 Principio di continuità	pag.	23
3.2 Teorema di Bernoulli	pag.	24
3.3 Forza esercitata dal vento su un profilo	pag.	25
3.4 Potenza messa a disposizione dal vento	pag.	26
3.5 Influenza dell'altezza del rotore	pag.	27
3.6 Limite di Betz	pag.	28
3.7 Ipotesi alla base della teoria di Betz	pag.	29
3.8 Conversione Meccanica-Elettrica	pag.	34

4 Parti carrello

4.1	Ammortizzatore	pag.	37
4.2	Freni a disco	pag.	40
4.3	Mozzo meccanico	pag.	42
4.4	Albero meccanico	pag.	42
4.5	Telaio	pag.	42
4.6	Pistone	pag.	43
4.7	Pneumatico	pag.	45
4.8	Cerchione	pag.	51
4.9	Giunto meccanico	pag.	52

5 Studio di fattibilità di un microaerogeneratore carrellabile

5.1	Vincoli progettuali nello studio dell'aerogeneratore	pag.	54
5.2	Analisi dei componenti	pag.	55
5.3	Generalità dell'aerogeneratore	pag.	63
5.4	Analisi dei costi del progetto	pag.	67
5.5	Analisi dei pesi del progetto	pag.	69

6 Conclusioni e sviluppi futuri

6.1	Considerazioni sul progetto	pag.	70
-----	-----------------------------	------	----

	Bibliografia	pag.	72
--	---------------------	-------------	-----------

PREMESSA

La presente tesi discute la realizzazione di un carrello appendice sul quale possa essere montato un aerogeneratore della potenza di circa 8500 W facile da trasportare ed 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 ha il vantaggio di produrre energia con venti di bassa intensità (3 m/s), livelli di rumore contenuti da considerarsi trascurabili e un impatto visivo ambientale accettabile. Uno degli obiettivi è di massimizzare le prestazioni della turbina eolica ed essere in grado di competere sul mercato attuale, installando parallelamente un impianto fotovoltaico per dare una continuità maggiore all'energia generata.

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, ed è possibile lo spostamento del mezzo anche in zone altamente sconnesse grazie al telaio rinforzato e all'inserimento di freni e sospensioni. 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.

INTRODUZIONE:

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. Esso individua esplicitamente le politiche e le azioni operative che si dovranno sviluppare e stabilisce tempi e le 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 quelle future. Per questo motivo le Fonti rinnovabili si stanno progressivamente diffondendo in particolare quelle provenienti dal vento e dal sole, grazie anche a degli incentivi statali ed europei.

CAPITOLO 1)

LE FONTI RINNOVABILI

Energie rinnovabili

Le energie rinnovabili si intendono forme di energia che si rigenerano in tempi brevi e sono risorse naturali considerate "inesauribili". Una risorsa rinnovabile si dice anche "sostenibile", se il tasso di rigenerazione della medesima è uguale o superiore a quello di utilizzo.

Classificazione energia:

- l'irraggiamento solare (energia chimica, energia termica ed energia elettrica);
- il vento (fonte di energia meccanica ed energia elettrica);
- le biomasse (generazione termica e cogenerazione di calore ed elettricità);
- le maree e le correnti marine ;
- le precipitazioni utilizzabili tramite il dislivello di acque (idroelettrica).



Al contrario, le energie "non rinnovabili" (in particolare fonti fossili quali petrolio, carbone, gas naturale) possono esaurirsi nel giro di poche generazioni umane, da una parte a causa dei lunghi periodi di formazione e dall'altra parte a causa dell'elevata velocità alla quale vengono consumati. Le fonti di energia rinnovabili associate a tali risorse sono:

- energia solare
- solare termico e termodinamico
- solare fotovoltaico
- energia eolica
- energia idroelettrica
- energia geotermica
- energia da biomasse
- energia marina

Vengono inoltre classificate in "fonti programmabili"(impianti idroelettrici a serbatoio e bacino, rifiuti solidi urbani, biomasse, impianti assimilati che utilizzano combustibili fossili, combustibili di processo o residui"),e "fonti non programmabili" "impianti di produzione idroelettrici fluenti, eolici, geotermici, fotovoltaici, biogas".

1.1 ENERGIA SOLARE

L'energia solare ha molti vantaggi poiché è inesauribile, è una risorsa d'immediata reperibilità ed è pulita perché ci arriva attraverso i raggi del sole.

La quantità di energia solare che arriva sul suolo terrestre è enorme, circa diecimila volte superiore a tutta l'energia usata dall'umanità nel suo complesso. L'energia solare può essere utilizzata per generare elettricità (fotovoltaico) o per generare calore (solare termico).



Solare termico e termodinamico

Gli impianti solari termici permettono la conversione diretta dell'energia solare in energia termica per la produzione di acqua calda. La radiazione solare viene catturata da una superficie assorbente detta collettore solare o pannello solare (lastra di rame percorsa da una serpentina e pitturata di vernice nera o pannello selettivo trattato con biossido di titanio TINOX) e un serbatoio o una cisterna, ha il compito di accumulare l'energia termica in sostituzione delle caldaie alimentate tramite gas naturale. I collettori sono attraversati da un fluido termovettore incanalato in un circuito che lo porterà all'accumulatore. Ne esistono di vari tipi, i più recenti sono i tubi sottovuoto che hanno un alto rendimento ma sono più soggetti a rotture. Nel caso si utilizzi il calore del Sole per produrre corrente tramite l'evaporazione di fluidi vettori che alimentano turbine collegate ad alternatori, si parla di impianto solare termodinamico. Ormai è prossimo alla competitività in diverse applicazioni, soprattutto ove è in grado di sostituire anche impianti convenzionali. Tale tecnologia, a livello internazionale sufficientemente matura, trova in Italia condizioni particolarmente favorevoli, quali l'esposizione climatica ed in molte zone può fornire una percentuale molto alta (dal 50 al 75%) dell'energia necessaria a riscaldare l'acqua domestica.

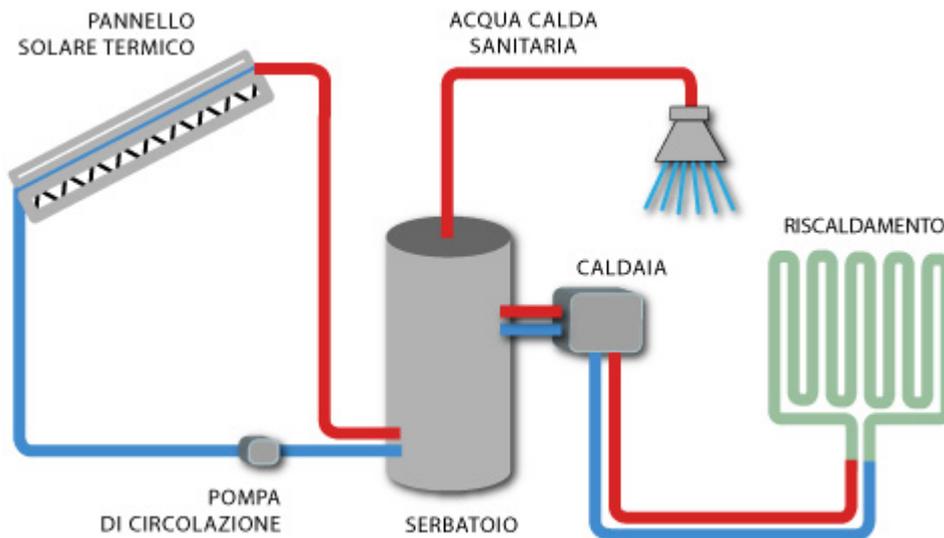


Gli impianti si distinguono in:

- a basse temperature (fino a 120 °C)
- a medie temperature (ca. 500 °C)
- ad alte temperature (ca. 1000 °C) (grossi impianti industriali)

Tipi di circolazione:

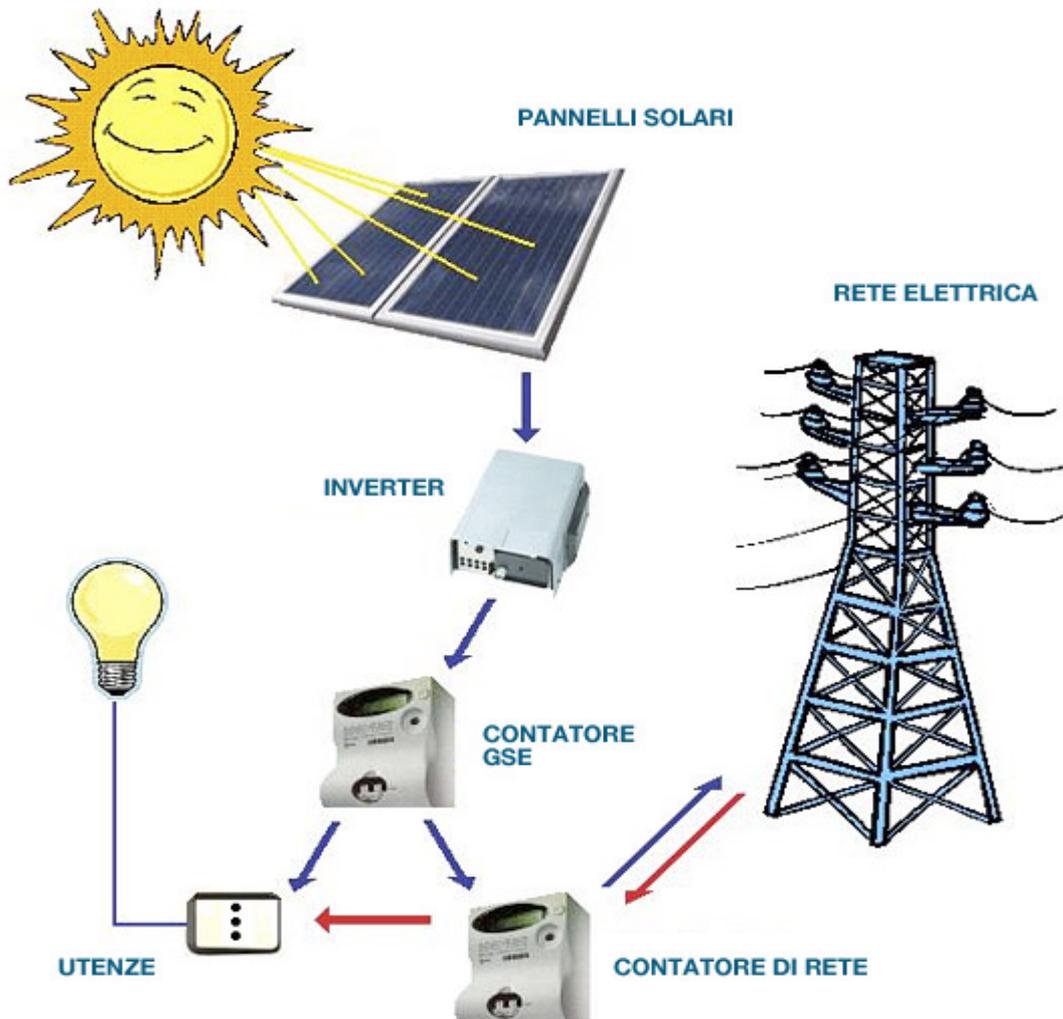
- naturale: in questo tipo il fluido è l'acqua stessa che riscaldandosi sale per convezione in un serbatoio di accumulo (boiler), che deve essere posto più in alto del pannello, dal quale viene distribuito alle utenze domestiche; il circuito è chiuso, in quanto l'acqua che viene consumata viene sostituita dall'afflusso esterno. Questo impianto ha per pregio la semplicità ma è caratterizzato da una elevata dispersione termica, a scapito della efficienza.
- forzata: un circuito composto dal pannello, una serpentina posta all'interno del boiler ed i tubi di raccordo. Una pompa, detta circolatore, permette la cessione del calore raccolto dal fluido, in questo caso glicole preellenico alla serpentina posta all'interno del boiler. Il circuito è notevolmente più complesso, dovendo prevedere un vaso di espansione, un controllo di temperatura ed altri componenti, ed ha un consumo elettrico dovuto alla pompa e alla centralina di controllo, ma ha una efficienza termica ben più elevata, visto che il boiler è posto all'interno e quindi meno soggetto a dispersione termica durante la notte o alle condizioni climatiche avverse.



Solare fotovoltaico

È una tecnologia che permette la conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica. La radiazione solare viene catturata da una superficie assorbente, detta pannello fotovoltaico composta da una serie di celle di silicio. L'energia elettrica prodotta di tipo continuo viene convertita in corrente alternata e inviata all'utenza. Se l'impianto è connesso alla rete elettrica nazionale, la corrente prodotta in eccesso viene ceduta alla rete, così come in caso di mancata produzione l'utenza preleva dalla rete. Esteticamente simile al pannello solare termico, ma, pur avendo entrambi l'energia solare (radiazione solare) come fonte di energia primaria, hanno scopi e funzionamento differenti. L'Italia ha sinora sostenuto un considerevole sforzo pubblico per alimentare il mercato degli impianti fotovoltaici. I moduli in silicio mono o poli-cristallini rappresentano la maggior parte del mercato; sono tecnologie costruttivamente simili e prevedono che ogni cella fotovoltaica sia cablata in superficie con una griglia di materiale conduttore che ne canalizzi gli elettroni. Ogni cella viene connessa alle altre mediante nastri metallici, in modo da formare opportuni circuiti in serie e in parallelo. La necessità di silicio molto puro attraverso procedure di purificazione dell'ossido di silicio (SiO_2 , silice) presente in natura eleva il costo della cella fotovoltaica. Sopra una superficie posterio-

re di supporto, in genere realizzata in un materiale isolante con scarsa dilatazione termica, come il vetro temperato o un polimero come il tevlar, vengono appoggiati un sottile strato di acetato di vinile (spesso indicato con la sigla EVA), la matrice di moduli preconnessi, un secondo strato di acetato e un materiale trasparente che funge da protezione meccanica anteriore per le celle fotovoltaiche, in genere vetro temperato. Dopo il procedimento di pressofusione, che trasforma l'EVA in mero collante inerte, le terminazioni elettriche dei nastri vengono chiuse in una morsettiera stagna generalmente fissata alla superficie di sostegno posteriore, e il risultato ottenuto viene fissato ad una cornice in alluminio, che sarà utile al fissaggio del pannello alle strutture di sostegno atte a sostenerlo e orientarlo opportunamente verso il sole. (S, S-W, S-E)



1.2 ENERGIA EOLICA

L'energia eolica è la conversione dell'energia del vento in una forma utilizzabile.

Il vento è il movimento dell'aria sulla superficie terrestre, tra zone di alta pressione e bassa pressione. La superficie della Terra è riscaldata in modo non uniforme dal Sole, a seconda di fattori come l'angolo di incidenza dei suoi raggi sulla superficie (che differisce con la latitudine e l'ora del giorno) e se la zona è aperta o fitta di vegetazione. Inoltre, grandi masse d'acqua, come ad esempio gli oceani si riscaldano e si raffreddano più lentamente della terra. Le differenze di temperature quindi generano differenze di pressione. La presenza di due punti con differente pressione atmosferica ori-

gina una forza, detta forza del gradiente di pressione o forza di gradiente, che agisce premendo sulla massa d'aria per tentare di ristabilire l'equilibrio e dunque dando luogo al fenomeno del vento. La rotazione della Terra, inoltre, trascina l'atmosfera intorno ad essa causando turbolenze (Forza di Coriolis). Questi effetti si combinano portando ad una costante variabilità dei venti. La quantità totale di energia economicamente estraibile dal vento è molto maggiore rispetto a quella attualmente fornibile da tutte le altre fonti. Generalmente l'energia eolica viene convertita attraverso l'utilizzo di aerogeneratori che producono energia elettrica, tramite mulini a vento che producono energia meccanica, pompe a vento che pompano l'acqua oppure ancora vele che spingono in moto le navi. Per lo più vengono costruite centrali eoliche, grandi parchi eolici costituiti da centinaia di singoli aerogeneratori collegati alla rete di trasmissione di energia elettrica. L'off-shore è più stabile, fornisce più energia e possiede un minor impatto visivo, tuttavia i costi di realizzazione e manutenzione sono notevolmente più alti, mentre piccoli impianti on-shore forniscono elettricità a luoghi isolati.

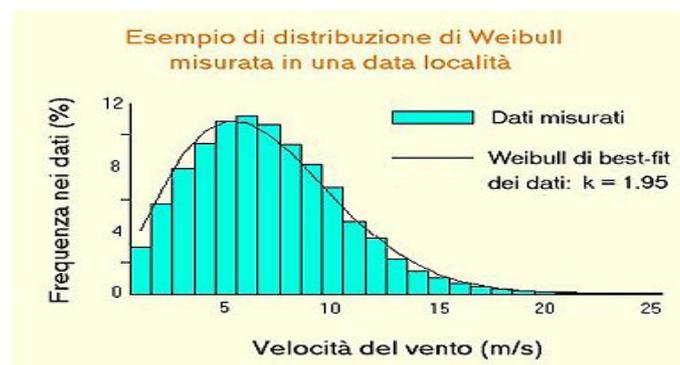


(Impianti Off-Shore)



(Impianti On-Shore)

Inoltre le società elettriche acquistano sempre di più elettricità in eccesso prodotta da piccoli aerogeneratori domestici. L'energia eolica è una fonte stabile di anno in anno, ma ha una variazione significativa su scale di tempo più brevi. L'intermittenza del vento crea raramente problemi quando essa viene utilizzata per fornire fino al 20% della domanda totale di energia elettrica, ma se la richiesta è superiore, vi è necessità di particolari accorgimenti alla rete di distribuzione e una capacità di produzione convenzionale o alternativa. Per la gestione della potenza prodotta si utilizzano diversi stratagemmi come sistemi di stoccaggio (come stazioni di pompaggio), turbine geograficamente distribuite, fonti alternative, accordi import-export. La forza del vento è variabile e un valore medio per un determinato luogo non è in grado di indicare da solo la quantità di energia che potrebbe produrre una turbina eolica lì posizionata. Per valutare la frequenza delle velocità del vento ad una posizione particolare, una funzione di densità di probabilità è spesso usata per descrivere i dati osservati. Luoghi diversi avranno diverse distribuzioni di velocità del vento. Il modello di Weibull rispecchia da vicino l'effettiva distribuzione ogni ora/dieci minuti. Il fattore di Weibull è spesso vicino a 2 e quindi una distribuzione di Rayleigh può essere utilizzata come un modello meno accurato ma più semplice.



1.3 ENERGIA IDROELETTRICA

Tra le più antiche, di larga scala e pulite fonti, l'energia idroelettrica è ricavata dalla forza delle acque. Il flusso d'acqua di un lago, un fiume o un bacino artificiale, opportunamente convogliato attraverso apposite condutture, può trasformare la sua forza in energia di pressione e cinetica, la quale alimenta un generatore che la converte in elettricità. La prima diga della storia fu costruita dagli antichi egizi 6.000 anni fa per convogliare le acque del Nilo e dopo fu sfruttata con i mulini ad acqua. Il suo contributo alla produzione mondiale di energia elettrica è, attualmente, del 18%. Le centrali idroelettriche hanno il vantaggio di avere lunga durata (molte delle centrali esistenti sono operative da oltre 100 anni). Inoltre le sono "pulite" in quanto producono molte meno emissioni nel loro "ciclo vitale" rispetto agli altri tipi di produzione di energia.

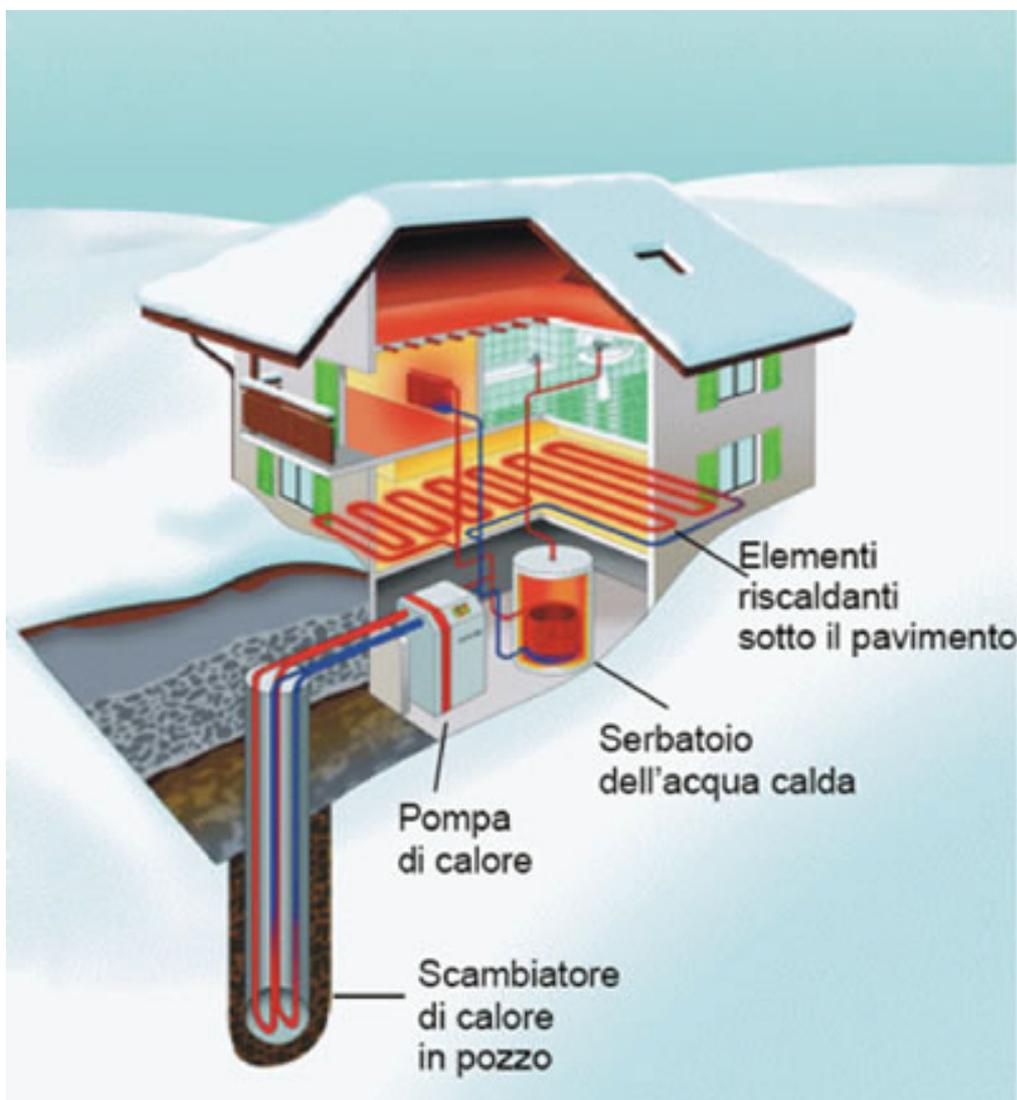


1.4 ENERGIA GEOTERMICA

L'energia geotermica è l'energia generata per mezzo di fonti geologiche che posseggono elevate temperature e può essere considerata una forma di energia rinnovabile, se valutata in tempi brevi. Si basa sullo sfruttamento del calore naturale della Terra, prodotto a causa di processi di decadimento nucleare di elementi radioattivi quali l'uranio, il torio e il potassio, contenuti all'interno della Terra. Questa energia viene trasferita alla superficie terrestre attraverso i movimenti convettivi del magma o tramite le acque circolanti in profondità. Le acque sotterranee, venendo a contatto con le rocce ad alte temperature, si riscaldano e in alcuni casi vaporizzano. Gli impianti geotermici possono essere usati per il riscaldamento, rinfrescamento degli edifici e produzione di acqua calda. Possono essere di due tipi:

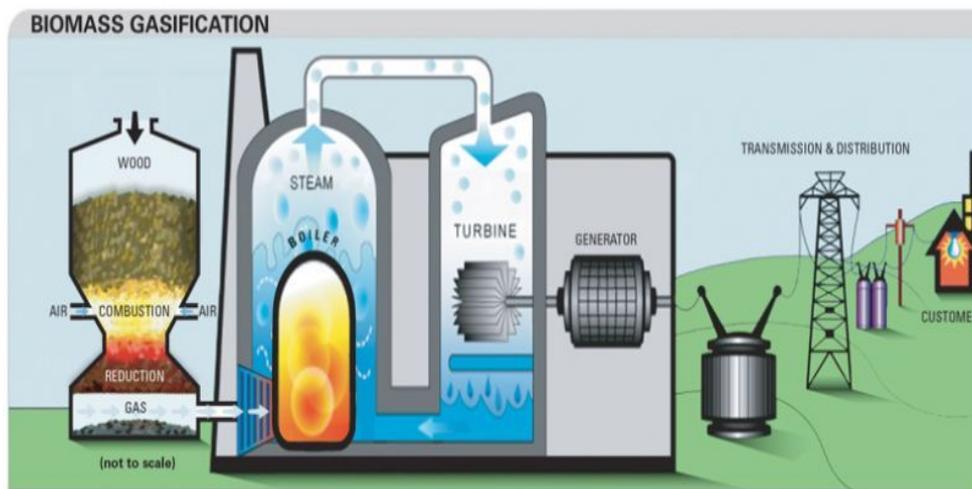
- a sonda verticale: le tubazioni vengono inserite verticalmente nel terreno fino a profondità di 150 m per il prelievo di calore dal sottosuolo;
- a sonda orizzontale: le tubazioni in questo caso sono inserite in modo orizzontale nel terreno, e svolgono lo stesso ruolo delle precedenti.

Un interessante uso delle acque geotermiche a basse temperature è costituito dall'innaffiamento delle colture di serra o all'irrigazione a effetto climatizzante, in grado di garantire le produzioni agricole anche nei paesi freddi. L'energia geotermica costituisce oggi meno dell'1% della produzione mondiale di energia. È una fonte energetica a erogazione continua e indipendente da condizionamenti climatici, ma essendo il calore difficilmente trasportabile, è utilizzata per usi prevalentemente locali. Le centrali geotermiche possono funzionare 24 ore al giorno, fornendo un apporto energetico di base e nel mondo la capacità produttiva potenziale stimata di 85 GW circa per i prossimi 30 anni. Tuttavia l'energia geotermica è accessibile soltanto in aree limitate del mondo come ad esempio l'Islanda.



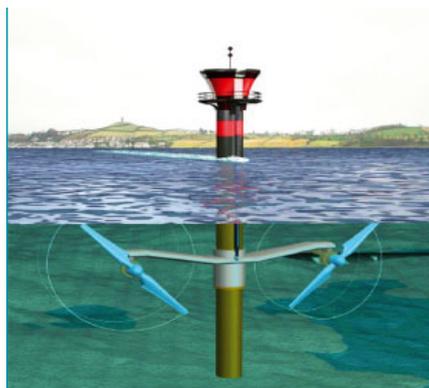
1.5 ENERGIA DA BIOMASSE

Da materiali di scarto di origine organica, di natura vegetale e animale, è possibile ottenere una fonte di energia pulita immediatamente utilizzabile. Con il termine "biomassa" si intende "la frazione biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui di origine biologica provenienti dall'agricoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti. L'utilizzo delle biomasse per fini energetici non contribuisce ad aggravare il fenomeno dell'effetto serra, poiché la quantità dell'anidride carbonica immessa in atmosfera durante la decomposizione, sia che essa avvenga naturalmente sia che avvenga attraverso la combustione, è equivalente a quella assorbita durante la crescita della biomassa stessa. Quindi, se le biomasse bruciate sono rimpiazzate con nuove biomasse, non vi è alcun contributo netto all'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera.



1.6 ENERGIA MARINA

Con energia marina s'intende l'energia racchiusa in varie forme nei mari e negli oceani. Tramite particolari tecniche, si sfruttano le potenzialità offerte dal mare quali il moto ondoso, il movimento dell'aria al di sopra delle onde, le maree o la differenza di temperatura tra il fondo e la superficie. L'impiego di questa fonte, comunque, è ancora abbastanza complicato e al momento piuttosto costoso.



CAPITOLO 2)

TURBINA EOLICA

I generatori eolici a partire dal 1985 hanno migliorato drasticamente il rendimento, dimensioni e costi. Tali generatori sono riusciti a passare da una produzione di pochi kilowatt di potenza a punte di 3 megawatt per i più efficienti, e una potenza installata tipica di mercato pari a circa 1,5 MW, con una velocità del vento minima di 3-4 m/s.

Lo sfruttamento del vento è attuato tramite macchine eoliche divisibili in due gruppi distinti in funzione del tipo di modulo base adoperato: finito generatore eolico o aerogeneratore:

- Generatori eolici ad asse orizzontale, in cui il rotore va orientato (attivamente o passivamente) parallelamente alla direzione di provenienza del vento;
- Generatori eolici ad asse verticale, indipendenti dalla direzione di provenienza del vento.

Un generatore sia ad asse verticale che orizzontale richiede una velocità minima del vento (cut-in) di 3–5 m/s ed eroga la potenza di progetto ad una velocità del vento di 12–14 m/s. Ad elevate velocità (20–25 m/s, velocità di cut-off) l'aerogeneratore viene bloccato dal sistema frenante per ragioni di sicurezza. Il bloccaggio può avvenire con freni che bloccano il rotore o con metodi che si basano sul fenomeno dello stallo. Esistono anche generatori a pale mobili che seguono l'inclinazione del vento, mantenendo costante la quantità di elettricità prodotta dall'aerogeneratore, e a doppia elica, per aumentare la potenza elettrica prodotta. I generatori eolici possono essere silenziosi; il problema principale è la dimensione delle pale e l'impatto negativo sul paesaggio. I giri al minuto del rotore dell'aerogeneratore sono molto variabili, come lo è la velocità del vento; in genere si utilizzano delle scatole d'ingranaggi (planetari) per aumentare e rendere costante la velocità del rotore del generatore e per permettere un avvio più facile con venti deboli. La corrente immessa nella rete deve essere costante alla frequenza di 50 hertz in Europa (in America sono 60 Hz) e 220 V (110 V America), perciò il rotore del generatore è collegato a una serie di convertitori prima di immettere l'energia in rete. La cinematica del generatore eolico è caratterizzata da bassi attriti, moderato surriscaldamento che necessita di un sistema di refrigeranti (olio oppure acqua che disperdono il calore grazie a radiatori) e un costo di manutenzione relativamente basso (pressoché nullo soprattutto per il magnetoeolico).

2.1 GENERATORE AD ASSE ORIZZONTALE

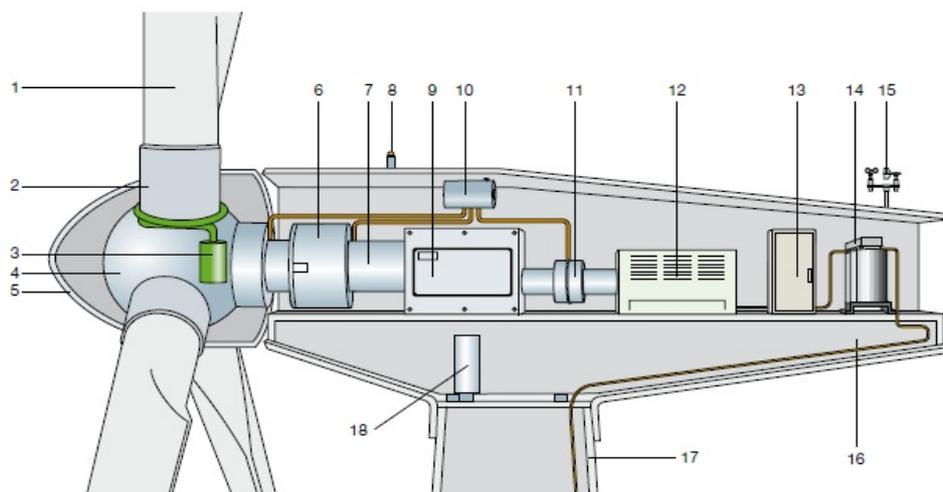
Un generatore eolico ad asse di rotazione orizzontale al suolo (HAWT, in inglese Horizontal Axis Wind Turbines) è formato da una torre in acciaio di altezze tra i 60 e i 100 metri sulla cui sommità si trova un involucro (gondola) che contiene un generatore elettrico azionato da un rotore a pale lunghe tra i 20 e i 60 metri. Esso genera una potenza molto variabile, che può andare da pochi kW fino a 5-6 MW, in funzione della ventosità del luogo e del tempo. Il mulino a vento è un esempio storico di generatore ad asse orizzontale.



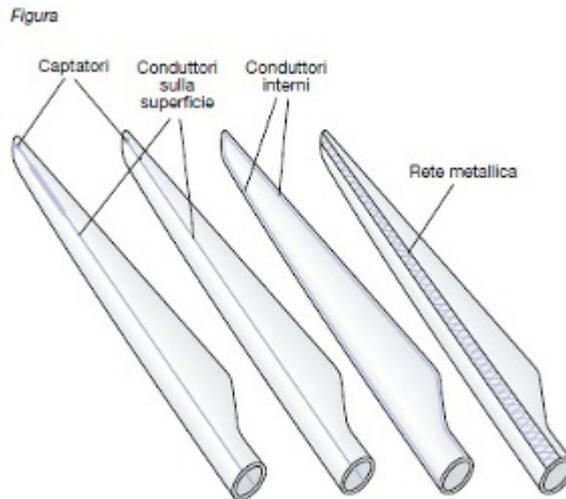
Gli aerogeneratori tradizionali hanno, quasi senza eccezioni, l'asse di rotazione orizzontale. Questa caratteristica è il limite principale alla realizzazione di macchine molto più grandi di quelle attualmente prodotte: i requisiti statici e dinamici che bisogna rispettare non consentono di ipotizzare rotori con diametri molto superiori a 100 metri e altezze di torre maggiori di 180 metri. Queste dimensioni riguardano macchine per esclusiva installazione off-shore. Le macchine on-shore più grandi hanno diametri di rotore di 70-100 metri e altezze di torre di 110 metri. In una macchina così costruita il diametro della fondazione in cemento armato è pari a circa 20 metri. La velocità del vento cresce con la distanza dal suolo; questa è la principale ragione per la quale i costruttori di aerogeneratori tradizionali spingono le torri a quote così elevate. La crescita dell'altezza, insieme al diametro del rotore che essa rende possibile, sono la causa delle complicazioni statiche dell'intera macchina, che impone fondazioni complesse e costose e strategie sofisticate di protezione in caso di improvvise raffiche di vento troppo forte.

Principali componenti (come in figura):

1. pala;
2. supporto della pala;
3. attuatore dell'angolo di Pitch;
4. mozzo;
5. ogiva;
6. supporto principale;
7. albero principale;
8. luci di segnalazione aerea;
9. moltiplicatore di giri;
10. dispositivi idraulici di raffreddamento;
11. freni meccanici;
12. generatore;
13. convertitore di potenza e dispositivi elettrici di controllo, di protezione e sezionamento;
14. trasformatore;
15. anemometri;
16. struttura della navicella;
17. torre di sostegno;
18. organo di azionamento per l'imbardata.



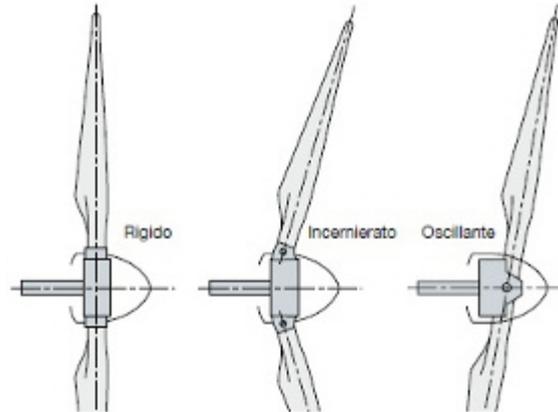
Le pale sono i componenti interagenti con il vento e sono progettate con un profilo tale da massimizzare l'efficienza aerodinamica. Poiché le esse variano col quadrato della velocità relativa, crescono rapidamente con la distanza dal mozzo ed è quindi importante progettare la porzione della pala vicino all'estremità al fine di avere una buona portanza ed una bassa resistenza. La sezione della pala è piuttosto consistente per ottenere l'elevata rigidità necessaria per resistere ai carichi meccanici variabili agenti nel normale funzionamento che contribuiscono a determinare l'usura.



Il vento infatti esercita una forza non costante, sia per le fluttuazioni dovute alla turbolenza, sia per la maggior velocità in funzione dell'altitudine. Inoltre, durante la rotazione, una pala collocata in posizione elevata è sottoposta a un vento più intenso rispetto ad una collocata più in basso, con conseguenti fluttuazioni di carico che si ripetono ad ogni rotazione. La forza centrifuga dovuta alla rotazione esercita una trazione sulle diverse sezioni della pala ed il suo peso crea un momento flettente sulla base in modo alternato ad ogni rotazione. Questa parte viene realizzata con materiali leggeri, come quelli plastici rinforzati in fibra, con buone proprietà di resistenza all'usura e danno a fatica. Le fibre sono in genere di vetro o alluminio per gli aerogeneratori medio-piccoli, mentre per quelle più grandi vengono utilizzate le fibre di carbonio laddove si manifestano i carichi più critici. Le fibre sono inglobate in una matrice di poliestere, resina epossidica o a base di vinil-estere costituenti due gusci uniti insieme e rinforzati da una matrice interna. La superficie esterna della pala viene ricoperta con uno strato levigato di gel colorato, al fine di prevenire l'invecchiamento del materiale composito a causa della radiazione ultravioletta. In funzione della tecnologia impiegata dal costruttore, le pale possono essere dotate di elementi aggiuntivi, quali i regolatori di stallo per stabilizzare il flusso d'aria, i generatori di vortice per aumentare la portanza o alette d'estremità per ridurre la perdita di portanza e il rumore. Poiché la principale causa di avaria è rappresentata dai fulmini, viene adottata una protezione attraverso l'installazione di conduttori, sia sulla superficie che all'interno della pala. Le pale e il mozzo centrale (che insieme costituiscono il rotore) sono montati sulla navicella tramite un'apposita flangia di cuscinetti. Il mozzo in una turbina eolica è il componente che connette le pale all'albero principale trasmettendo ad esso la potenza estratta dal vento ed ingloba i meccanismi di regolazione dell'angolo di Pitch.

Solitamente di acciaio o di ferro a grana fine sferoidale è protetto esternamente da un involucro di forma ovale chiamato ogiva.

Classificazione mozzo :



- rigido, è progettato per mantenere le principali parti che lo costituiscono in posizione fissa rispetto all'albero principale. L'angolo di Pitch delle pale può comunque essere variato, ma non è consentito alcun altro movimento. È di fatto il tipo più utilizzato nei rotori a tre o più pale e deve possedere una robustezza tale da sopportare i carichi dinamici trasmessi dalle pale e dovuti alle operazioni d'imbardata.
- oscillante (teetering) è utilizzato in quasi tutte le turbine a due pale ed è invece progettato per ridurre i carichi aerodinamici sbilanciati trasmessi all'albero tipici dei rotori bipala, consentendo al rotore di oscillare di alcuni gradi rispetto alla direzione perpendicolare all'asse di rotazione dell'albero principale. Il mozzo oscillante è stato principalmente abbinato a turbine con angolo di Pitch fisso, ma può anche essere utilizzato su turbine ad angolo variabile. Anche la progettazione del sistema di regolazione di Pitch è più complessa poiché i relativi meccanismi e quadri elettrici di manovra/protezione si trovano sulla parte mobile rispetto all'albero principale.
- per pale incernierate è, per certi versi, una via di mezzo tra i primi due modelli ed è di fatto un mozzo rigido con vincoli a cerniera per le pale ed utilizzato dalle turbine sottovento per ridurre i carichi eccessivi durante i forti venti.

I rotori ad asse orizzontale invece si suddividono in:

- monopala, con contrappeso: sono le più economiche, ma essendo sbilanciate generano rilevanti sollecitazioni meccaniche e rumore; sono poco diffusi



- bipala: hanno due pale poste a 180° tra loro ovvero nella stessa direzione e verso opposto. Hanno caratteristiche di costo e prestazioni intermedie rispetto alle altre due tipologie; sono le più diffuse per installazioni minori

- tripala: hanno tre pale poste a 120° una dall'altra: sono costose, ma essendo bilancia-



te, non causano sollecitazioni scomposte e sono affidabili e silenziose



Freni

Quasi tutte le turbine montano dei freni meccanici lungo l'albero di trasmissione, in aggiunta al freno aerodinamico. In molti casi i freni meccanici sono in grado di arrestare il rotore in condizioni meteorologiche avverse, oltre che svolgere la funzione di "freni di stazionamento" per impedire che il rotore si ponga in rotazione quando la turbina non è in servizio. Comunemente sono due i tipi di freni meccanici utilizzati:

- freni a disco;
- freni a frizione.

I freni a disco funzionano in modo simile a quelli delle automobili: un disco metallico è fissato all'albero che deve essere frenato. Durante la fase di frenamento delle pinze ad azionamento idraulico premono delle pastiglie contro il disco, creando una coppia frenante opposta a quella motrice.

I freni a frizione consistono in almeno un piatto di pressione ed un piatto di frizione. L'azionamento di questo tipo di freni è normalmente attuato attraverso delle molle che esercitano un'opportuna pressione, mentre vengono rilasciati mediante aria compressa o un fluido idraulico. I freni meccanici possono essere posizionati sia sul lato a bassa velocità, sia su quello ad alta velocità del moltiplicatore di giri. Tuttavia occorre tener presente che se installati sul lato a bassa velocità devono essere in grado di esercitare una coppia frenante maggiore. Se invece vengono installati sul lato ad alta ve-

locità agiscono necessariamente attraverso il moltiplicatore di giri velocizzando potenzialmente il suo invecchiamento. Inoltre nel caso in cui il moltiplicatore sia guasto i freni sul lato alta velocità potrebbero essere esclusi e non in grado di frenare il rotore. La qualità del materiale dei dischi del freno montati sull'albero ad alta velocità è più critica per l'intensità delle forze centrifughe che si sviluppano. I freni progettati per arrestare il rotore devono essere in grado di esercitare una coppia frenante maggiore di quella massima che ci si aspetta sia originata dal rotore, con tempi di arresto solitamente inferiori a 5s ed in grado di funzionare anche in caso di guasto alla loro alimentazione di energia esterna. Devono inoltre essere in grado di mantenere il rotore nella posizione di arresto completo per le condizioni di vento definite per almeno 1 ora dalla loro attivazione (IEC 61400-1).

Sistema d'imbardata

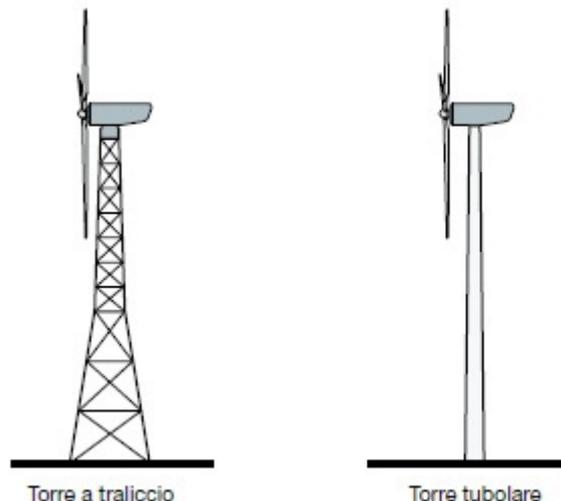
La navicella viene fatta ruotare sulla sommità della torre da un sistema di controllo d'imbardata e di movimentazione attivo costituito da attuatori elettrici e relativi riduttori, per far sì che il rotore sia sempre trasversale al vento. La direzione e velocità del vento vengono monitorati continuamente da sensori collegati sul tetto della navicella. In genere il rotore viene posizionato secondo la direzione media del vento, calcolati sui 10min dal sistema di controllo della turbina. Per le turbine ad asse orizzontale con rotore sottovento non sono necessari sistemi d'imbardata, poiché la turbina si auto orienta intrinsecamente seguendo la direzione del vento come una banderuola. Le turbine sopravvento hanno invece o una pinna posteriore d'orientamento (turbine medio-piccole) o un controllo attivo d'imbardata, pertanto la torre di sostegno deve essere adeguatamente dimensionata anche per resistere ai carichi torsionali risultanti dall'uso dei sistemi stessi.

Torre

Sono due i principali tipi di torri utilizzate per le turbine ad asse orizzontale :

- a traliccio;
- tubolari.

Le turbine odierne sono per la maggior parte di tipo tubolare perché presentano diversi vantaggi ri-



petto a quelle a traliccio: in particolare le torri tubolari non necessitano di numerose connessioni tramite bulloni che devono poi essere controllate periodicamente; forniscono un'area protetta per l'accesso alla turbina e la salita sulla navicella più sicura ed agevole tramite scala interna o ascensore nelle turbine più grandi; inoltre sono esteticamente più piacevoli rispetto ai tralicci. Esiste un

terzo tipo di torre, la torre a tiranti, ma è poco utilizzata per gli impianti in media-grossa potenza mentre è particolarmente indicata per impianti minieolici. L'altezza della torre dipende dal regime di vento del sito d'installazione. Le torri tubolari sono usualmente costruite in acciaio laminato, anche se alcune sono in cemento; hanno forma conica, con il diametro alla base maggiore di quello alla sommità in cui è posta la navicella. Le diverse sezioni sono collegate e vincolate tra loro da flange imbullonate. Tali tipi di torri creano una notevole scia sottovento ed è per questo che nella maggior parte delle turbine il rotore è posto sopravvento. Inoltre sono strutture molto visibili e pertanto non devono mostrare segni di corrosione per diversi anni: a tal fine deve essere scelto un rivestimento adeguato. Le torri sono infisse nel terreno mediante fondazioni costituite in genere da plinti di cemento armato collocati ad una certa profondità.

Sistemi di regolazione

Una tipica turbina eolica può essere schematizzata in modo semplificato attraverso un modello meccanico comprendente una massa rotante ad elevato momento d'inerzia che rappresenta il rotore ed una massa rotante che rappresenta il generatore, collegate dall'albero di rotazione (vedi figura accanto). A questo modello meccanico sono applicate la coppia aerodinamica agente sul rotore, la coppia elettromagnetica agente sul generatore e l'eventuale coppia applicata all'albero dai freni meccanici. Al di sotto della velocità nominale del vento, i sistemi di controllo e di regolazione agiscono per massimizzare la coppia aerodinamica (e quindi la potenza estratta), mentre al di sopra della velocità nominale i sistemi di controllo modulano tale coppia per mantenere la velocità di rotazione entro limiti accettabili. Nelle turbine progettate per funzionare con velocità di rotazione fissa, la coppia del generatore varia in funzione della coppia aerodinamica e l'unico metodo per controllare la coppia del generatore (e quindi la potenza in uscita) è agire regolando la coppia aerodinamica stessa. Nelle turbine a velocità di rotazione variabile invece la coppia del generatore può essere variata indipendentemente dalla coppia aerodinamica, pertanto la velocità di rotazione del rotore può essere controllata sia agendo sulla coppia aerodinamica che sulla coppia del generatore con la risultante accelerazione o decelerazione del rotore. La variazione della coppia del generatore è effettuata mediante l'interposizione di un convertitore elettronico di potenza che regola fase e frequenza della corrente circolante negli avvolgimenti del generatore.



2.2 GENERATORE AD ASSE VERTICALE

Un generatore eolico ad asse di rotazione verticale al suolo (VAWT, in inglese Vertical Axis Wind Turbines) è un tipo di macchina eolica contraddistinta da una ridotta quantità di parti mobili nella sua struttura, il che le conferisce un'alta resistenza alle forti raffiche di vento e la possibilità di sfruttare qualsiasi direzione del vento senza doversi orientare di continuo. È una macchina molto versatile, adatta sia all'uso domestico che alla produzione centralizzata di energia elettrica nell'ordine del MegaWatt (una sola turbina soddisfa il fabbisogno elettrico mediamente di circa 1000 case). Macchine eoliche ad asse verticale sono state concepite e realizzate fin dal 1920.



Eolico magnetico

Un promettente sviluppo dell'energia eolica è quella eolico-magnetica cioè prodotta con qualche tipo di aerogeneratore magnetoeolico con effetto di riduzione dell'attrito sperimentato dal rotore e dell'asse e del pignone principale del rotore con guadagno notevole di efficienza e minor costo di manutenzione.



2.3 MINIEOLICO E MICROEOLICO

Si tratta di impianti di piccola taglia, adatti ad un uso domestico o per integrare il consumo elettrico di piccole attività economiche tipicamente in modalità stand-alone, cioè sotto forma di singoli generatori, connesse poi alla rete elettrica (con contributo alla cosiddetta generazione distribuita) o ad impianti di accumulazione. Di solito questi impianti sono costituiti da aerogeneratori del tipo ad asse orizzontale con diametro del rotore da 3 a 20 metri e altezza del mozzo da 10 a 20 metri. Solitamente per minieolico si intendono impianti con una potenza nominale fra 20 kW e 200 kW, mentre per microeolico si intendono impianti con potenze nominali inferiori ai 20 kW.



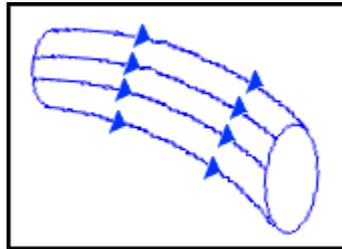
Per questi impianti di piccole dimensioni il prezzo di installazione risulta più elevato, attestandosi attorno ai 1500-3000 euro per kW installato, in quanto il mercato di questo tipo di impianti è ancora poco sviluppato; tra le cause le normative che, a differenza degli impianti fotovoltaici, in quasi tutta Europa non ne sostengono la diffusione. Questi impianti possono sfruttare le specifiche condizioni del sito in cui si realizza l'installazione. Sono impianti adattabili, che riescono a sfruttare sia venti deboli che forti e che riescono ad intercettare le raffiche improvvise tipiche dell'Appennino. Per la valutazione dell'idoneità del luogo non si effettua solitamente una campagna di misure in sito (come avviene per installazioni medio-grandi), per l'elevata incidenza che tale costo potrebbe avere sull'investimento globale. La valutazione, nel caso si ritenga sufficiente la disponibilità di vento (come velocità e continuità), deve considerare altri fattori quali: l'interferenza con altre strutture, l'inquinamento acustico, la lunghezza del percorso elettrico, eventuali vincoli ecologici (presenza di specie protette) o storico-archeologici. Sono in corso di sviluppo nuovi sistemi di aerogeneratori "da tetto", a basso costo (500 euro) e bassa resa (40 KW al mese) che non necessita del costoso inverter e che dunque può essere collegato alla rete elettrica domestica, alimentando direttamente altri apparecchi elettrici a basso consumo.

CAPITOLO 3

MODELLO MATEMATICO

cenni di fluidodinamica

Per studiare il comportamento del vento sulle pale della turbina eolica andiamo ad utilizzare il metodo sviluppato da Eulero (1707-1783) specificando la densità $\rho(x,y,z,t)$ nel punto di coordinate x,y,z all'istante t . Questo vuol dire che sarà focalizzata l'attenzione su ciò che avviene in un determinato spazio ad un certo istante, piuttosto che considerare quello che accade nello specifico ad una particolare particella di fluido in moto. Fissando l'attenzione su un determinato punto della massa fluida $P(x,y,z)$, 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). Se si conosce in tutta la massa del fluido la funzione $v(x,y,z,t)$, si avrà 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 vede che in regime stazionario il moto delle particelle è costante.



Tutte le linee di corrente che passano attraverso una generica sezione S formano un tubo di flusso. L'intero condotto, al limite, costituisce un tubo di flusso. Si osservi che le particelle di fluido non possono entrare né uscire dalle pareti laterali di un tubo di flusso, un esempio di ciò è mostrato per un fluido in regime stazionario.

3.1 PRINCIPIO DI CONTINUITA'

Dato che non abbiamo 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.

3.2 TEOREMA DI BERNOULLI

In fluidodinamica, l'equazione o teorema di Bernoulli rappresenta una particolare forma semplificata dell'equazione di Navier-Stokes, ottenuta qualora si consideri 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.

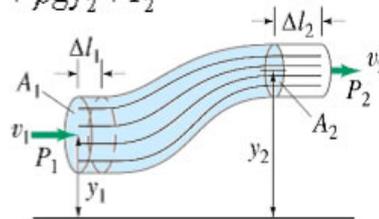
$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad \text{(I)} \\ \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad \text{(II)} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad \text{(III)} \end{array} \right.$$

Equazione di Navier-Stokes

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 infatti la somma della pressione, della densità di energia cinetica (energia cinetica per unità di volume) e della densità di energia potenziale (energia potenziale per unità di volume) è costante lungo un qualsiasi tubo di flusso. Di seguito l'equazione di Bernoulli indicando con p la pressione, con ρ la densità, v la velocità e g l'accelerazione gravitazionale:

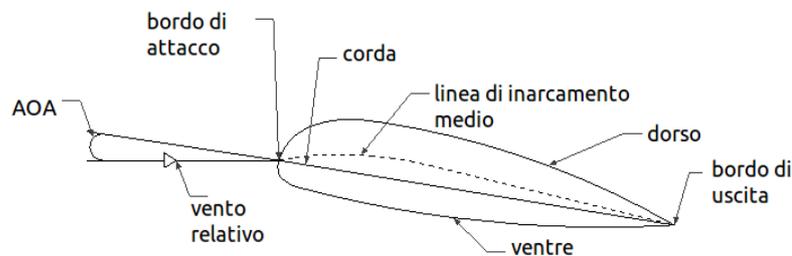
$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 + P_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2 + P_2$$

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y + P = \text{costante}$$

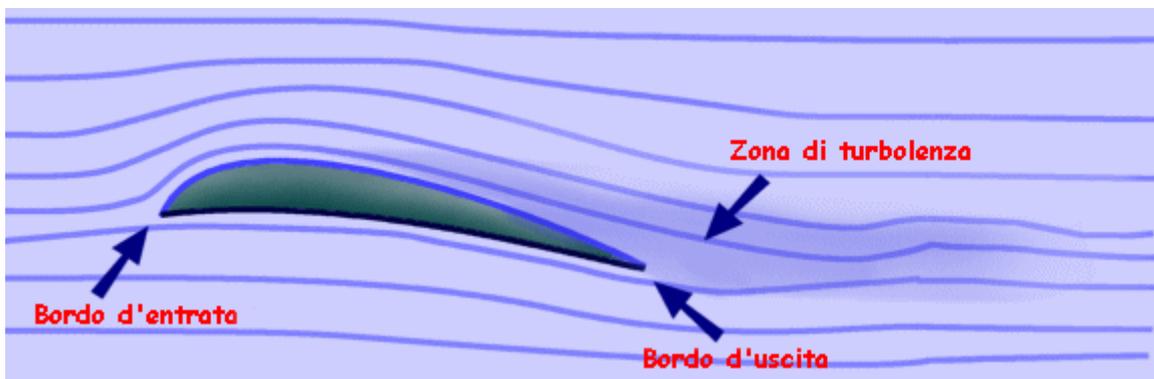


3.3 FORZA ESERCITATA DAL VENTO SU UN PROFILO

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 non è altro che la sezione trasversale di un'ala, dal bordo di entrata dell'ala a quello d'uscita. L'incidenza alare invece può essere definita come l'angolo d'inclinazione (positivo o negativo) della corda alare rispetto alla direzione del vento relativo, cioè la risultante della somma vettoriale delle due velocità vento reale e velocità dell'ala. La corda alare è il segmento (ideale) che unisce il bordo di entrata con quello di uscita.



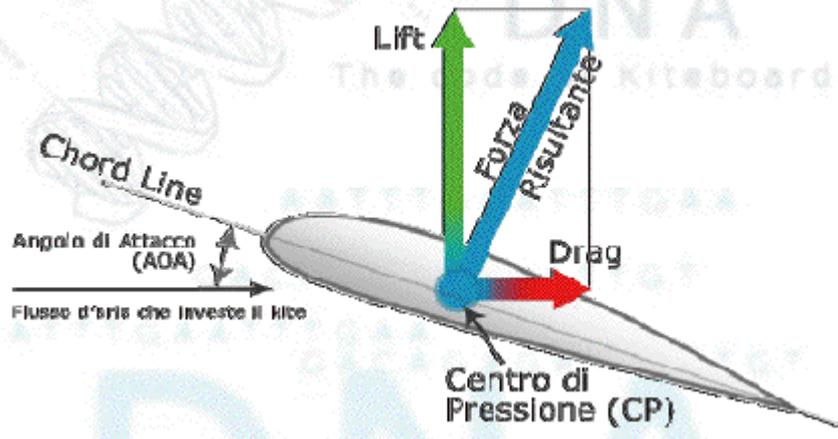
Per verificare come interagisce il vento sull'ala, la poniamo in galleria del vento. L'ala è ferma nella galleria a vento, l'aria fluisce su di essa da sinistra verso destra. Un po' sopravvento all'ala è sistemata una fila di iniettori di fumo. Il fumo viene trasportato dalla corrente rendendo visibili le linee di flusso.



I

I profili alari sono molto efficaci per deviare ed accelerare l'aria e di conseguenza generare portanza. Il flusso d'aria, con velocità costante, quando incontra il profilo si divide in due parti, quella superiore accelera fino alla massima velocità corrispondente al massimo spessore e successivamente decelera finendo nella zona di turbolenza dove si creano dei vortici, e quella inferiore che viene deviata

dal corpo verso il basso. Di conseguenza, le particelle d'aria superiori arrivano prima al bordo d'uscita rispetto a quelle sul ventre e per il teorema di Bernoulli in un tubo all'aumentare della velocità diminuisce la pressione. Attraverso la differenza di pressione (bassa sul dorso, alta sul ventre) si genera portanza una forza che sostiene perpendicolarmente il profilo. A valle del corpo i due flussi si rincontrano e per la forza di gradiente di pressione l'aria tende in maniera naturale a ripristinare un flusso omogeneo creando però dei vortici che innescano una forza chiamata di resistenza. La Forza Aerodinamica è la somma delle due componenti le quali sono applicate nel centro di pressione come in figura.



Quindi l'unica differenza tra i profili alari e le pale delle turbine eolica sta nel movimento: è traslatorio nell'ala, è rotatorio per l'elica.

3.4 POTENZA MESSA A DISPOSIZIONE DAL VENTO

Una vena fluida di massa m (Kg) in moto laminare a velocità v (m/s) possiede un'energia cinetica pari a:

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

Se consideriamo adesso una sezione trasversale alla direzione del moto, di area A , misurata in metri quadrati, e misuriamo la massa m che attraversa A nell'unità di tempo, otteniamo:

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

La densità dell'aria varia con la legge:

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

Dove H_m è 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.

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

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

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

3.5 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:

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

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

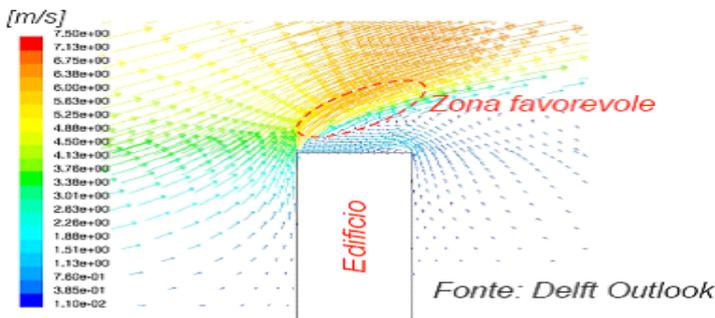
Tale coefficiente vale circa 0.2-0.4 per suoli mediamente rugosi, dove per rugosità si intende la presenza di corpi quali edifici, alberi, strutture, ecc, che impediscono la linearità del moto del vento.

Come si vede 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.

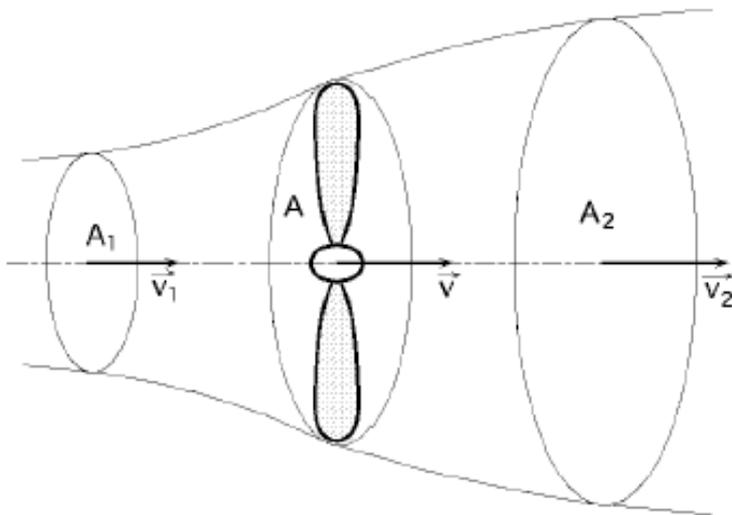
Deformazione della distribuzione logaritmica del vento in base al parametro di irregolarità del terreno



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



3.6 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. L'energia cinetica raccolta dalla turbina è tanto maggiore quanto minore è la velocità con la quale il vento lascia la turbina stessa. Il vento viene quindi frenato e la sua velocità in uscita sarà compresa tra 0 e il valore della sua velocità in ingresso. L'espressione della potenza teorica messa a disposizione dal vento l'abbiamo calcolata precedentemente e vale:

$$P = \frac{1}{2} A \cdot \rho \cdot v^3 [W] \quad (6)$$

Naturalmente se la massa d'aria in uscita dal rotore avesse velocità nulla, allora la potenza catturata dalla corrente in moto sarebbe pari alla potenza teorica posseduta inizialmente dal fluido.

Tutto questo però non si può verificare, 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 che in realtà si può catturare dalla massa di aria in moto non può che essere inferiore a quella che teoricamente possiede, in particolare essa risulta ridotta del 60%. Questo valore è frutto dalla trattazione teorica chiamata Legge di Betz, che prescinde dalla forma del generatore eolico. Vengono considerate le seguenti condizioni di lavoro ideali:

- Densità dell'aria secca pari a 1,21 kg/m³ composta dal 79% di N₂ e dal 21% di O₂ in volume;
- Temperatura di 15°C (288 K);
- Pressione di 1 atm (101325 Pa).

3.7 IPOTESI ALLA BASE DELLA TEORIA DI BETZ

1. Concetto di tubo di flusso: il tubo di corrente che attraversa il disco attuatore non interagisca con la restante porzione di fluido che lo circonda.
 2. In ogni sezione del tubo di flusso sussista 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.
 3. Nelle sezioni in finitamento a monte e a valle si possa ritenere una situazione fluidodinamica indisturbata dalla presenza della macchina, ovvero sussista la pressione atmosferica dell'ambiente esterno, proprio come nella condizione di getto libero.
 4. Il flusso eolico non incontri ostacoli oltre la turbina, né sopravento né sottovento.
 5. Il vento sia stazionario e di intensità costante con la quota.
 6. Non ci siano effetti di rotazione della vena a causa dell' "estrazione" di quantità di moto.
 7. Si trascuri la comprimibilità dell'aria, cioè densità ritenuta costante.
- L'ultima ipotesi è molto semplificativa ma comunque ragionevole.

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. Possiamo quindi dire che la velocità finale è una frazione della velocità iniziale.

$$\bullet \quad v_2 = f v_1 \quad (7)$$

Chiamiamo f fattore di interferenza assiale del rotore.

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

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

- $\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = m \Rightarrow$ equazione di continuità

(8)

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

La potenza istantanea che agisce sul rotore sarà:

- $P = \frac{dL}{dt} = F \cdot \cos \Phi \cdot \left(\frac{dx}{dt} \right) = F \cdot v = m \cdot (v_1 - v_2) \cdot v$ (9)

Se adesso integriamo 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:

- $v dv + \cancel{g dz} + \frac{dp}{\rho} + \cancel{dR} + dL = 0 \Rightarrow v dv + dL = 0 \Rightarrow \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + L = 0$ (10)

- $L = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \Rightarrow P = \cancel{m} L = \rho \cdot A \cdot v \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$ (11)

Il valore assunto dalla velocità del vento in corrispondenza del rotore si determina mettendo a sistema le espressioni (9) e (10).

$$\begin{cases} P = F \cdot v = \cancel{m} (v_1 - v_2) \cdot v \\ P = \cancel{m} \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \end{cases} \quad (12)$$

Risolvendo il sistema rispetto a v otteniamo:

$$\bullet \Rightarrow (v_1 - v_2) \cdot v = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \Rightarrow v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (13)$$

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

Riscriviamo la [13] utilizzando la relazione [7].

$$\bullet v = \frac{1}{2} \cdot v_1 (1 + f) \quad (14)$$

Utilizzando l'equazione [11] e sostituendo al posto di v e v_2 , rispettivamente le relazioni [12] e [7], possiamo scrivere la forza come:

$$\bullet F = \rho \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot v_1 (1 + f) \cdot \frac{1}{2} (v_1 - f v_1) \quad (15)$$

Eseguiamo la derivata del rendimento in funzione di f e la poniamo uguale a zero per trovare i valori che rendono massimo questo rendimento.

$$\bullet \frac{d\eta}{df} = 1 - 2f - 3f^2 \quad (16)$$

Da cui otteniamo i due valori:

$$\bullet \cancel{f = -1} \vee f = \frac{1}{3} \quad (17)$$

Naturalmente il valore $f=1$ è inconsistente altrimenti vorrebbe dire che la presenza del rotore non incide sulla velocità della vena fluida.

Sostituiamo adesso il valore trovato nell'equazione del rendimento e otteniamo che il massimo rendimento aerodinamico ottenibile in un generatore eolico è:

$$\bullet \quad \eta_{\max} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} \cong 59.3\% \quad (18)$$

Solitamente si esprime questo rendimento come coefficiente di potenza indicato con C_p , dato dal rapporto tra la potenza che effettivamente si riesce a catturare dal vento e quella posseduta dalla vena fluida indisturbata che si muove con velocità v .

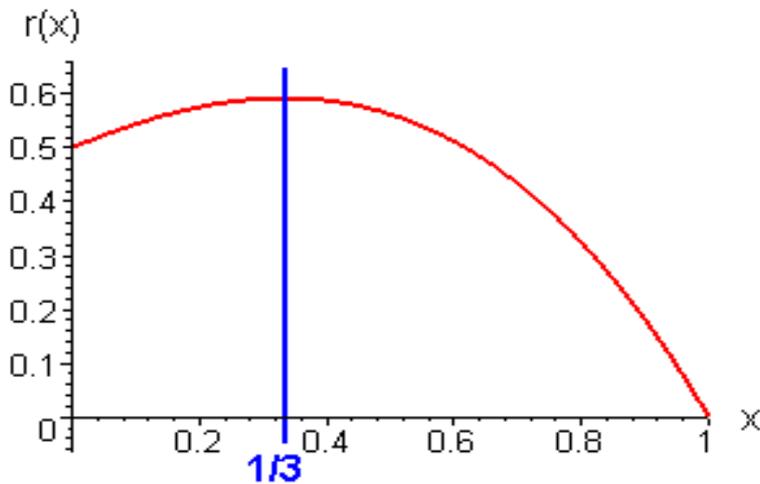
$$\bullet \quad C_p = \frac{P}{P_o} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - f^2) \cdot (1 + f)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3} = \frac{1}{2} \cdot (1 - f^2) \cdot (1 + f) \quad (19)$$

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

$$\bullet \quad C_p = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (20)$$

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

andamento del cp

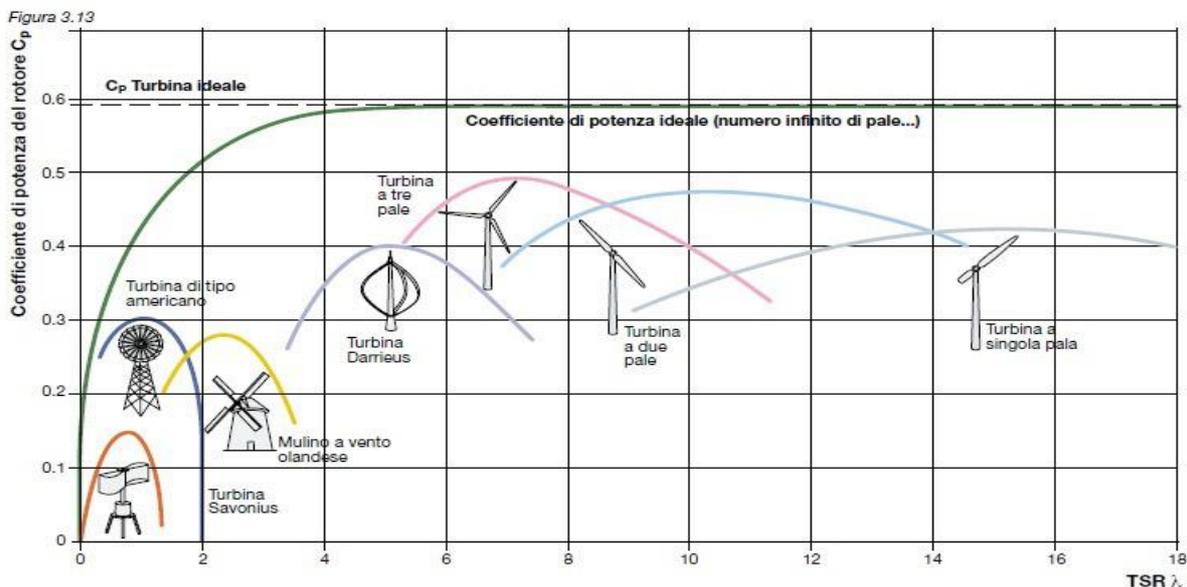


La figura mostra l'andamento del C_p (ordinata), in funzione del fattore di interferenza f (ascissa), si vede come la curva che definisce il C_p ha un massimo per $f=1/3$ e quindi come si era accennato in precedenza, senza considerare alcun tipo di perdita, sia essa di natura meccanica o elettrica, al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

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 neppure costante, ma varia con la velocità del vento.

Molto spesso si esprime questo coefficiente in funzione di un altro parametro, il blade tip-speed ratio (λ) definito dal rapporto tra la velocità tangenziale delle pale alla loro estremità e la velocità del vento.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{u} \quad (21)$$



3.8 CONVERSIONE MECCANICA-ELETTRICA

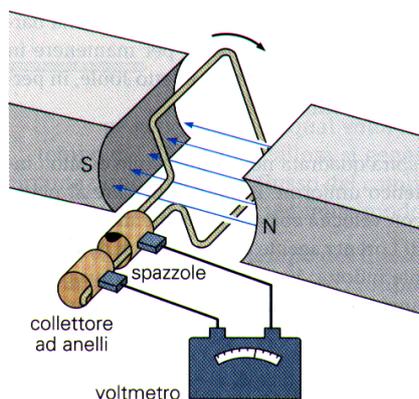
La seconda conversione di energia per importanza che avviene nelle macchine eoliche è quella da energia meccanica ad energia elettrica.

Il meccanismo principale è il generatore e sfrutta i principi dell'induzione elettromagnetica. Vogliamo ricordarne la base scientifica, in particolare il principio secondo cui muovendo un filo elettrico all'interno di un campo elettromagnetico si crea nel filo una tensione, e se ai capi del filo c'è un utilizzatore, una corrente elettrica. Il generatore è perciò un insieme di apparati che rendono possibile la creazione del campo elettromagnetico e il movimento di conduttori all'interno di questo campo in modo da creare la tensione e la corrente, ossia l'energia elettrica. Le macchine elettriche a cui appartengono i generatori e i motori possono creare e utilizzare energia in forme diverse:

- Corrente alternata;
- Corrente continua;
- Corrente a impulsi;
- Corrente trifase.

Solitamente negli impianti mini-eolici viene prodotta corrente continua in uscita dal sistema, ciò è dovuto a diversi motivi: innanzitutto, il vento ha una velocità troppo variabile per mantenere costante in numero di giri del rotore (la corrente alternata avrebbe una frequenza variabile e mai uguale a quella della rete), in secondo luogo, si pone il problema di disporre di energia elettrica nei periodi di calma di vento, o di immagazzinare l'energia prodotta in eccesso nei momenti di minor consumo, problema che può essere risolto caricando delle batterie, le quali però utilizzano corrente continua.

La corrente alternata e i generatori di tensione (alternatore – dinamo).



Produrre corrente elettrica non è, almeno concettualmente, difficile. La figura rappresenta schematicamente un alternatore. Se mediante una forza meccanica si fa ruotare la spira posta all'interno del campo magnetico della calamita rappresentata, all'interno della spira si avrà una corrente indotta in quanto varia il flusso del campo magnetico che la attraversa. Il flusso è dato dalla formula $\Phi = (B) \cdot B = cS\epsilon$, nel caso specifico, ruotando la spira, è \cos il fattore variabile che può essere espresso, in funzione del tempo, come $\cos t$ essendo ω la velocità angolare che si ritiene costante. Se la rotazione è costante in un verso, si può riflettere sul fatto che all'interno della spira la corrente cambia ogni mezzo giro, questo fatto può essere semplice-

mente dedotto dal fattore variabile \cos che fra 0° e 360° assume appunto valori sia positivi che negativi; ciò è alla base delle denominazioni corrente alternata e alternatore.

Lo schema di funzionamento è semplice:

- la spira ruota, possibilmente con velocità angolare costante, causando la variazione del flusso magnetico e conseguentemente la corrente indotta,
- la spira ha due contatti striscianti con due collettori (anelli) dai quali partono i fili che giungono, poi, alla presa della corrente,
- quando il circuito è chiuso la corrente oscilla nel circuito così ottenuto.

Formule:

Il flusso magnetico, attraverso la spira che ruota, può essere espresso da $\Phi = (B) \cdot S \cdot \cos \theta$, essendo ω la velocità angolare di rotazione della spira;

ricordando la legge di Faraday, si ha $f \cdot e = -n \cdot \frac{d\Phi}{dt}$, che altro non è che la derivata della funzione del flusso, si ha: $f \cdot e = n \cdot B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \theta$;

la tensione varia tra i valori $\pm B \cdot S \cdot \omega$; il prodotto $B \cdot S \cdot \omega$ corrisponde quindi al valore massimo che la forza elettromotrice può assumere e quindi la formula precedente si può anche esprimere:

$$f \cdot e = m_a \cdot \sin \theta \cdot \omega$$

anche se la corrente è alternata, la legge di Ohm rimane invariata e, pertanto, l'intensità della corrente sarà espressa dalla formula:

$$i = \frac{f \cdot e}{R} = \frac{m_a \cdot \sin \theta \cdot \omega}{R}$$

Quando di una corrente elettrica alternata si dice, per es., che ha una tensione di 220 V o ha un'intensità di 4 A si allude al suo **valore efficace**, ovvero si attribuisce a questa corrente alternata i valori che avrebbe una corrente continua che, a parità di altre condizioni, provocherebbe i medesimi effetti, pensando in particolar modo all'effetto Joule (riscaldamento).

Il legame formale-matematico fra il valore efficace della tensione di una corrente alternata e la formula precedente è il seguente:

$$f \cdot e_{efficace} = \frac{f \cdot e_m \cdot m_a}{\sqrt{2}}$$

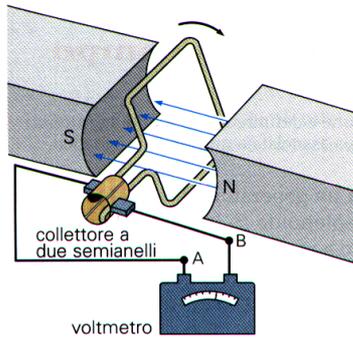
E per l'intensità della corrente:

$$i_{efficace} = \frac{i_{m_a}}{\sqrt{2}}$$

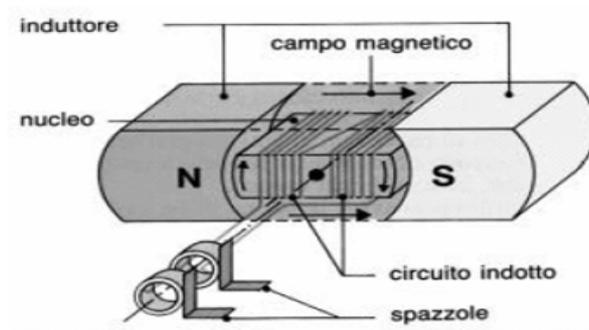
La dinamo è un generatore di corrente elettrica nel quale i collettori di corrente elettrica sono due semianelli disposti in modo tale per cui quando all'interno della spira cambia il verso della corrente, cambia anche il contatto tra filamento della spira e i due semianelli, pertanto i due semi anelli raccolgono sempre la corrente che fluisce sempre nello stesso verso e per questo è detta *continua* anche se non è costante (pulsante) per tensione e intensità.

so

II



fatto che non sia costante permette di trasformarne la tensione con l'uso dei trasformatori.



CAPITOLO 4)

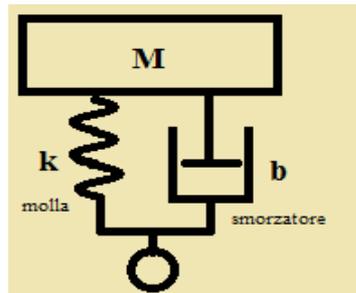
PARTI CARRELLO

4.1 AMMORTIZZATORE

L'ammortizzatore è un sistema che ha lo scopo di smorzare l'oscillazione o rallentare un movimento (compressione o estensione) delle sospensioni di un macchinario.

Il sistema Massa-Molla-Smorzatore

In un sistema del primo ordine la costante di tempo è sufficiente a descrivere il comportamento del sistema sollecitato da uno dei segnali considerati (gradino, impulso, onda quadra ...). In un sistema del secondo ordine vi sono due componenti che possono accumulare energia e una componente che la dissipa. La molla accumula energia elastica, la massa accumula energia potenziale e lo smorzatore introduce un attrito che tende a trasformare in calore non più riutilizzabile l'energia, che passa dalla massa alla molla e viceversa, e quindi a porre termine allo scambio di energia tra la massa e la molla.



Le sospensioni di un veicolo.

Le ruote di un veicolo sono collegate al telaio tramite le sospensioni; queste hanno la funzione di *addolcire* le brusche vibrazioni impresse al veicolo, dalle discontinuità del fondo stradale. La funzione di ingresso è la sollecitazione F_i impressa verticalmente alla massa del veicolo, la variabile di uscita è la funzione $y(t)$ che descrive il moto verticale del baricentro del veicolo, rispetto a un osservatore solidale all'asse della ruota, prescindendo dal moto orizzontale del veicolo stesso. La molla e lo smorzatore, collegati al telaio da un lato e all'asse dall'altro, seguono il moto della massa M . La molla, deformandosi in lunghezza, agisce sulla massa M con una forza: $F_y = -k \cdot y$

ovvero proporzionale all'entità della deformazione in lunghezza della molla, e opposta al verso della deformazione stessa. Lo smorzatore, si oppone allo spostamento della massa, con una forza di attrito viscoso $F_v = -b \cdot v$

proporzionale, tramite il coefficiente di attrito viscoso b , alla velocità.

Per il secondo principio della dinamica l'accelerazione a della massa M è determinata dalla risultante R delle forze applicate:

$$R = M \cdot a$$

R indica la somma vettoriale delle forze applicate al baricentro del sistema, ma poichè tutte le forze agiscono nella direzione dell'asse y, R coincide con la somma delle componenti delle forze lungo tale asse, e l'equazione fondamentale della dinamica si scrive:

$$F_i - b \cdot v - k \cdot y = M \cdot \ddot{y}$$

Nella quale:

$$v = \dot{y}$$

Le due equazioni trovate costituiscono un sistema di equazioni che descrivono il moto del baricentro nel tempo. Il coefficiente di smorzamento si definisce $Z = \frac{b}{2\sqrt{Mk}}$ e la pulsazione naturale si definisce $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}}$.

! $Z > 1$

Se il coefficiente di smorzamento è maggiore di 1 la funzione $y(t)$, ovvero il moto del baricentro, è una curva che passa gradualmente da una posizione di equilibrio ad un'altra.

! $Z < 1$

Se il coefficiente di smorzamento è minore di 1 la funzione $y(t)$ è una curva che parte dalla posizione di equilibrio con una velocità tale da superare la nuova posizione di equilibrio, per poi compiere delle oscillazioni intorno ad essa prima di assestarsi.

! $Z = 0$

Se il coefficiente di smorzamento è 0, la funzione $y(t)$ è una senoide, perchè il baricentro oscilla indefinitamente intorno alla posizione di equilibrio. Corrisponde al caso in cui è assente lo smorzatore e l'energia viene passata alternativamente dalla massa alla molla, provocando un moto oscillatorio che non si ferma mai. Il comportamento di un sistema del secondo ordine, sollecitato da un gradino, è tale quindi che, se il coefficiente di smorzamento è minore di uno, allora il sistema raggiunge l'equilibrio oscillando intorno al valore di regime. Nell'ammortizzatore ciò si verifica quando, a seguito di una brusca sollecitazione agente verticalmente, la massa deforma la molla avviando uno scambio alternato di energia tra massa e molla, che lo smorzatore tende a dissipare. Il periodo delle oscillazioni, nel caso $Z < 1$, è

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d}$$

Nella maggior parte dei casi gli ammortizzatori assumono la forma di un cilindro con un pistone che scorre all'interno (sono telescopici), dove il cilindro esterno (fodero) è riempito con un fluido (come fluido idraulico) o per via aerea (sistemi pneumatici), mentre il pistone dello stelo (cilindro interno) agisce su di esso. Quindi vengono utilizzati per ridurre l'effetto sgradevole che si ha nel viaggiare su terreno accidentato, portando ad una migliore qualità di guida a l'aumento del comfort e, cosa importante, ad una migliore stabilità e guidabilità del veicolo. Senza ammortizzatori infatti le ruote del veicolo si staccerebbero da terra a causa di qualche deformazione del manto stradale portando la ruota a perdere aderenza e di conseguenza alla perdita del controllo del veicolo. L'energia verrebbe assorbita solo dal pneumatico e poi rilasciata violentemente, portando il veicolo a sollevarsi da terra irregolarmente.

Essi possono avere un:

- Singolo effetto, questi ammortizzatori agiscono solo in una delle due direzioni/situazioni (compressione o estensione) mentre l'altra è libera di scorrere senza restrizioni, questo tipo d'ammortizzatore sono generalmente utilizzati sulle forcelle delle moto, dove con le forcelle teleidrauliche si hanno due ammortizzatori.

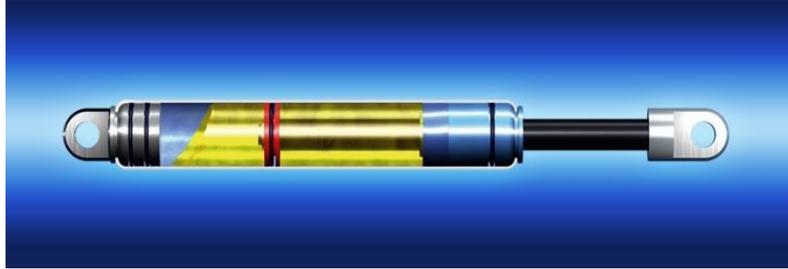


- Doppio effetto, agiscono sia in estensione che in compressione e generalmente sono ammortizzatori singoli, come nel caso dell'applicazione delle automobili o nei monoammortizzatori posteriori delle motociclette.

Ammortizzatore idraulico

L'ammortizzatore idraulico è un dissipatore viscoso ed è composto da due cilindri coassiali, uno esterno anulare e uno interno nel quale scorre uno stantuffo con lo stelo ancorato al telaio o viceversa. Il cilindro interno è sempre pieno d'olio, quello esterno solo parzialmente e il volume di olio nei due cilindri è regolato da vari sistemi a singolo o a doppio effetto. L'ammortizzatore a olio si basa sulla viscosità dell'olio, sul lume di passaggio e sulla velocità di compressione, dove in condizione di lume costante si ha un aumento esponenziale della resistenza allo scorrimento all'aumentare della velocità di compressione e quindi di scorrimento dell'olio. La valvola del foderò interno e il gruppo di tenuta sono realizzati da polveri metalliche (generalmente ferro-grafite-rame) compattate con una pressa e fuse in forno, mentre il pistone mobile viene generalmente realizzato in acciaio, mentre altre parti come il foderò possono essere realizzate in vari materiali, generalmente acciaio o alluminio. Il volume comprimibile può essere aria o azoto a pressione ambiente o pressurizzato o in alternativa un elemento elastico, come una molla elicoidale.

4.2 FRENO A DISCO



Il freno a disco è un dispositivo il cui scopo è rallentare o fermare la rotazione di una ruota e il mezzo a cui essa è vincolata. Durante la frenata, un meccanismo preme le pastiglie contro il disco (solidale alla ruota) generando così una forza d'attrito direttamente proporzionale alla pressione. Di conseguenza la ruota riceve una coppia che contrasta la sua rotazione, cioè un'azione frenante. Un freno a disco è costituito da un disco in ghisa o in acciaio e da un sistema a pinza che spinge contro di esso una coppia di pastiglie composte da materiale d'attrito che ne causano il rallentamento assieme a quello della ruota. La pressione di spinta della pinza è generata grazie ad un dispositivo idraulico (autoveicoli) o meccanico (biciclette).



Calcolo del momento frenante

Se si considera la forza Q normale alla pinza, che spinge la pastiglia contro la superficie del disco in fase di frenatura, e riferendosi ad una superficie di disco in finitesima, di apertura $d\alpha$ e dimensione radiale dr , si ha che:

$$Q = \int_0^\alpha \int_{R_1}^{R_2} r p d\alpha dr$$

essendo $r d\alpha dr$ la superficie in finitesima normalmente alla quale agisce il carico, che in termini finiti ha intensità Q e P la pressione applicata durante la frenatura

e ancora:

$$Q = \alpha \int_{R_1}^{R_2} pr dr = \alpha K (R_2 - R_1)$$

Il momento frenante vale:

$$M_f = \int_0^\alpha \int_{R_1}^{R_2} fr pr d\alpha dr$$

con $r d\alpha dr$ la superficie su cui agisce la forza tangenziale in finitesima $f dQ$ ed f il coefficiente di attrito.

Si ottiene quindi:

$$M_f = \alpha f \int_{R_1}^{R_2} pr r dr$$

Ma dal calcolo di Q si è visto che:

$$pr = K = \frac{Q}{\alpha} \frac{1}{(R_2 - R_1)}$$

Quindi si ha:

$$M_f = \alpha f \frac{Q}{\alpha} \frac{1}{(R_2 - R_1)} \frac{R_2^2 - R_1^2}{2} = Q f \frac{R_2 + R_1}{2}$$

Il momento frenante in un freno a disco dipende dal coefficiente d'attrito (aumenta con esso), dalla forza Q e dalle dimensioni R_1, R_2 ed è dato dalla risultante Q applicata al raggio medio dell'accoppiamento pastiglia-disco. Poiché il calcolo è stato effettuato su una faccia del disco, il momento frenante complessivo è

$2M_f$.

4.3 MOZZO MECCANICO

Il mozzo è la parte centrale di una ruota o di un organo rotante che porta generalmente cuscinetti alloggiati al suo interno per permettere alla componente che verrà montata sopra di esso di ruotare e il materiale di costruzione è l'acciaio.



Possono essere con aggancio al telaio o sospensione del tipo:

- Monolaterale, come nel caso delle auto o delle moto con forcellone monobraccio, in questo caso il mozzo è ruotante e trasmette il moto e le varie forze in gioco, dove l'elemento di supporto della sospensione ha un alloggiamento con battuta per il cuscinetto e una sede per il seeger.
- Bilaterale, come nel classico caso di moto e biciclette, in questo caso sono del tipo fisso e il moto viene trasmesso direttamente sul cerchione applicato sopra o come nel caso dei cerchi a raggi, sono formati da due parti, di cui una fissa e una mobile.

4.4 ALBERO MECCANICO

In meccanica, l'albero è un organo di trasmissione di un moto rotatorio.



Ha una grandissima quantità di applicazioni in tutti i campi della trasmissione del moto. Esso è quindi sottoposto ad uno sforzo di torsione; nella maggior parte dei casi, a causa di masse collegate all'albero stesso, esso è anche sottoposto a sforzo di flessione. Si pone, quindi, il problema dell'attrito tra la parte rotante (albero) e quella stazionaria (supporto), di cui è parte essenziale la definizione di giochi e interferenze. Per evitare che l'albero sia sottoposto ad una coppia di torsione troppo elevata, si può ricorrere alla chiavetta di Woodruff, la quale se sottoposta a uno sforzo eccessivo si rompe e svincola l'albero dal carico. Possiamo trovare cavità nel caso di un albero motore dritto, questo può essere creato cavo per poter aumentare la sua leggerezza senza compromettere alla sua rigidità nella torsione. Oppure contro rotante soluzione usata sui alcuni mezzi stradali, in particolare modo sulle motociclette, in modo da ridurre l'effetto giroscopico e ridurre l'impennata..

4.5 TELAIO

Il telaio è una struttura portante, che definisce la forma e la posizione delle parti necessarie dell'oggetto che costituisce, inoltre è essenziale e di vari tipi:

- Traliccio/tubi saldati
- Stampati
- Monoscocca
- Misti/scomponibile (in parte in tubi saldati e in parte stampato)

Telaio a traliccio o a tubi

Il telaio a tubi ha la caratteristica d'essere molto flessibile e resistente, mantenendo un ingombro minore rispetto agli altri tipi di telaio e per questo è molto utilizzato sia su moto da fuoristrada, fuoristrada e camion, perché sono mezzi che richiedono telai molto resistenti alle sollecitazioni. A traliccio quando ci sono i tubi principali del telaio che sono messi in comunicazione tra di loro tramite altri piccoli tubi aumentando la resistenza, mentre si finisce a tubi quando questi non sono interconnessi tra di loro.



Telaio stampato

Questo tipo di telai viene generalmente utilizzato per le moto, perché il costo finale è generalmente inferiore e pesa di meno, senza che questo risulti inferiore al telaio a tubi ed è più facile da costruire.



Telaio monoscocca

Sono un elemento unico con funzione portante e possono inglobare parte della carrozzeria; vengono utilizzati per il loro minor costo e peso rispetto a un telaio tradizionale, ma richiedono d'essere sostituiti più frequentemente in quanto più fragili e difficili da riparare.



Telaio misto/scomponibile

Questo tipo di telaio riesce a coniugare i vantaggi di entrambi i sistemi, ma risulta essere più complesso da studiare e comunque meno costoso rispetto al telaio a tubi. È costituito da una parte puramente in tubi e una parte in piastre stampate o ricavate dal pieno, unite tra loro tramite dei bulloni.

Tipologia:

- Perimetrale il telaio viene disposto più esternamente possibile, in modo da aumentare la rigidità del veicolo (visibilità)
- Diamante quando il telaio rimane più interno possibile seguendo linee più rettilinee possibili
- Omega ha la forma di una C rovesciata e viene utilizzato sulle moto con forcella

- A due pezzi questo telaio sempre per solo uso motociclistico è costituito da due parti che non sono connesse tra di loro, ma tramite il motore[

Caratteristiche costruttive:

- Forma della sezione possono essere ovali, circolari, quadrati, rettangolari, a doppia T o a C con lamierini interni d'irrigidimento.
- Spessore, aumentando lo spessore si aumenta la resistenza e la rigidità, cioè diminuiranno le deformazioni a parità di carico esterno e si potranno supportare carichi maggiori
- Dimensioni, aumentando proporzionalmente le dimensioni lineari del telaio la rigidità totale diminuirà, mentre aumentando le dimensioni della sezione la rigidità totale generalmente aumenta.

I materiali che possono essere utilizzati sono:

- Acciaio (mezzi di trasporto per telai a traliccio)
- Alluminio (mezzi di trasporto per telai stampati, estrusi o fusi)
- Carbonio (ambito sportivo, ciclismo, Formula 1)
- Ghisa (macchine utensili)
- Titanio (ambito sportivo)

4.6 PISTONE

Il pistone è la parte mobile di un organo idraulico o pneumatico, governata attraverso un fluido. Il sistema a cui appartiene il pistone è costituito da due parti meccaniche:

- il cilindro, costituito da un corpo cilindrico vuoto (un tubo), rettificato al suo interno;
- il pistone o stelo, costituito da un tondo pieno, rettificato all'esterno.

Lo stelo scorre all'interno del cilindro per effetto della pressione esercitata da un fluido contenuto internamente.



Un pistone è generalmente munito di attacchi ad occhiello alle 2 estremità, nei quali viene in filato un perno adatto a collegarlo, attraverso un apposito sistema (generalmente una forcella ad U) all'organo meccanico da governare (come ad esempio avviene per comandare i movimenti del braccio degli escavatori usati per il movimento-terra). Il sistema a pistone permette innumerevoli utilizzi: ad esempio nei sistemi frenanti a disco delle automobili. Si parla di cilindro idraulico (o pistone idraulico) nel caso in cui il fluido all'interno del cilindro sia un liquido (generalmente olio idraulico), mentre si parla di cilindro pneumatico (o pistone pneumatico) nel caso in cui il fluido all'interno del cilindro sia un gas (generalmente aria).

4.7 PNEUMATICO

Lo pneumatico, generalmente detto copertone o gomma, è l'elemento che viene montato sulle ruote e che permette l'aderenza del veicolo sulla strada, determinando assieme al peso complessivo del veicolo e alla tipologia di fondo il suo attrito con il fondo stradale.

Gli pneumatici si dividono in diverse categorie:

- Con camera d'aria (tube type):

La camera d'aria racchiude l'aria compressa



per ottenere un effetto di adatta-

mento e sospensione del veicolo dal terreno.

La copertura è fatta di gomma e tele di fibra o di metallo.

- Senza camera d'aria (tubeless):



La copertura, fatta di gomma e tele di fibra o di metallo, è costruita in modo da trasmettere e ricevere gli attriti radenti e volventi che si generano con il movimento. Essa funge anche da camera d'aria.

- NPT Non-pneumatic tires, pneumatici che non richiedono aria

Pieni, sono degli pneumatici che invece d'essere gonfiati ad aria sono riempiti di plastica o si auto-sostengono dato che hanno una struttura piena. (trattori anni 30)

Battistrada

Caratterizzazione:

Spessore, riscolpitura e tornitura

Lo spessore del battistrada è determinato dal tipo di pneumatico e ha un valore minimo che viene sia imposto per legge, che consigliato dal costruttore, il quale è meno permissivo e quindi determina uno spessore minimo del battistrada maggiore.

Pro filo, Mescola e Temperatura

Il pro filo dello pneumatico è studiato a seconda delle esigenze a cui deve rispondere e al mezzo a cui va applicato; può essere di due tipi:

- Normale/Turistico, studiato in modo da offrire la migliore guidabilità.

Nel caso degli pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione arrotondata tra spalla e battistrada.

Nel caso degli pneumatici motociclistici si ha il pro filo del battistrada arrotondato.

- Sportivo, studiato in modo da offrire la migliore tenuta.

Nel caso degli pneumatici automobilistici, questi avranno un'unione netta tra spalla e battistrada, in modo da massimizzare l'impronta a terra, anche se, come punto a sfavore, l'inserimento in curva risulta meno lineare/graduale. Nel caso degli pneumatici motociclistici si ha un profilo del battistrada con arrotondamento più marcato, sì da poter godere di maggiore superficie di contatto in piega. In entrambi i casi, la mescola più morbida consente allo pneumatico di avere un attrito maggiore. Nello pneumatico invernale la mescola e l'intagliatura permettono un aumento di temperatura più agevole e rapido per arrivare al valore per cui è stato studiato. Nello pneumatico sportivo i carichi dovuti ad attrito e brusche accelerazioni tendono da soli ad aumentare oltremodo la temperatura, quindi la mescola è studiata per lavorare a una temperatura elevata ma il profilo sarà studiato in modo che la temperatura raggiunga il livello ottimale solo in caso di guida sportiva; si ricorda quindi che gli pneumatici sportivi possono avere una tenuta di strada peggiore di quelli da turismo se non sono opportunamente portati in temperatura.



Il battistrada può essere:

- Monomescola si usa un solo tipo di mescola per la composizione del battistrada
- Plurimescola si adoperano più mescole per la composizione del battistrada, con passaggio netto o graduale da una mescola all'altra, soluzione adoperata per alcuni pneumatici motociclistici

Il disegno dello pneumatico per le autovetture, camion e di qualsiasi altro mezzo con 3 o più ruote può essere:

- Simmetrico, lo pneumatico adotta il medesimo intaglio su tutto il battistrada (obbligatorio per le motociclette).
- Asimmetrico, permette una funzione diversificata dello pneumatico, dove la parte più esterna, meno intagliata, reagisce meglio alle curve veloci e la parte interna, più intagliata, permette un miglior drenaggio dell'acqua.

Caratteristiche:

- Numero di scanalature, (più sono e più sarà drenante il battistrada)
- Profondità delle scanalature, (più lo sono e più sarà drenante il battistrada)

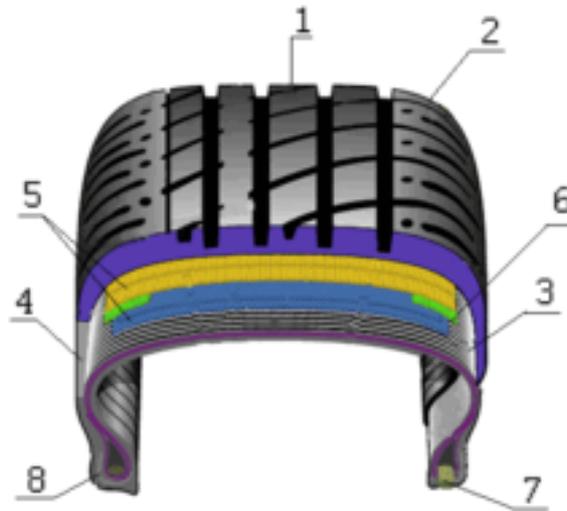
I due estremi sono i pneumatici da Cross (tacchetti) e da Motomondiale slick (privi di intagli). Si utilizzano anche un mix di entrambe sullo stesso pneumatico.

Caratteristiche pneumatico:

- Larghezza battistrada (maggiore larghezza corrisponde una maggiore capacità di tenuta, ma una minore velocità di cambio direzione e una minore tenuta su fondi bagnati);
- Altezza spalla (distanza tra il manto stradale e il cerchione; permette la deformazione del profilo dello pneumatico, migliorando l'assorbimento di urti (causati, per esempio, da fondi irregolari), maggiore altezza della spalla, corrisponde una minore reattività in fase di sterzata e una minore stabilità in appoggio su fondi duri e regolari, come le strade;
- Pressione pneumatico, una maggiore pressione corrisponde a una durezza maggiore dello pneumatico (regolabile in base al fondo stradale e al clima).
- Circonferenza della ruota, un valore maggiore corrisponde a un minore effetto delle irregolarità del terreno.
- Direzione di rotolamento, gli pneumatici possono essere disegnati in modo da dover essere utilizzati in un unico verso di rotazione, oppure avere un disegno che permetta un montaggio indifferenziato.
- Temperatura d'esercizio o funzionamento gli pneumatici, a seconda della loro struttura e del tipo d'impiego a cui sono destinati, hanno diverse temperatura di funzionamento (temperatura raggiunta dallo pneumatico stesso).

Aderenza degli pneumatici

L'aderenza degli pneumatici è definita dal coefficiente d'aderenza dello pneumatico, definito dalla mescola dello stesso, ma anche dalla larghezza, perché l'aderenza viene definita per il 75% dall'adesione, mentre il 25% viene definito dall'ingranamento (la gomma si adatta alle microdeformità del suolo) e cambia al variare della temperatura. In caso di pioggia, l'acqua si frappone tra asfalto e pneumatico, riducendo di conseguenza l'aderenza; quest'ultima si riduce maggiormente con pneumatici non drenanti e larghi, mentre con pneumatici drenanti (come gli invernali) e stretti si diminuisce questo effetto, giacché o viene drenata meglio, o spostata via più facilmente, data la maggiore pressione dello pneumatico stretto sul manto (per via della ridotta superficie di appoggio dello stesso). Un altro fattore che determina l'aderenza è la giusta pressione di gonfiaggio che varia l'impronta a terra.



Pneumatico radiale:

- 1: Battistrada
- 2: Bordo del battistrada
- 3: Carcassa
- 4: Fianco dello pneumatico o Spalla
- 5: Pacco cintura
- 6: Rinforzi laterali del pacco cintura
- 7: Cerchietti
- 8: Tallone

Parti del pneumatico:

- Battistrada: è l'elemento a contatto con l'asfalto, assicura la trazione del mezzo, resiste all'usura e protegge la carcassa, viene prodotto con la gomma .
- Pacco cintura o cinture e cintura radiale: strati multipli di corde o fili d'acciaio (materiale più usato), nylon, poliestere interposte tra la carcassa e il battistrada, che aumentano la resistenza dello pneumatico, stabilizzano il battistrada garantendo protezione contro urti e forature.
- Fianco dello pneumatico o spalla: protegge le tele dagli agenti atmosferici e chimici e inoltre si oppone alla flessione a cui è sottoposto durante l'impiego.
- Carcassa o tela: consente la trasmissione di tutte le forze di carico tra la ruota e il terreno come quelle che si sprigionano durante la frenata e nelle manovre di sterzata, inoltre garantisce la resistenza alla pressione di gonfiaggio e successivamente di esercizio durante tutte le manovre. Questo elemento è composto principalmente da fili di Nylon affiancati (tela) che possono essere di diverso spessore e conferire una maggiore resistenza o scorrevolezza, infatti con l'aumento della sezione dei fili e di conseguenza una loro diminuzione di fili per pollice.

- **Diagonale o a tele incrociate o bias:** le tele si estendono in diagonale da un tallone all'altro dello pneumatico formando un angolo di 30-40° con la linea mediana dello pneumatico stesso, dove ogni tela o strato successivo di filo va in direzione opposta e quindi incrociandosi.
- **Cinturato o bias belted:** si tratta di una carcassa diagonale provvista del pacco cinturra, la quale conferisce caratteristiche analoghe ai pneumatici radiali.
- **Radiali:** le tele si estendono da un tallone all'altro con un angolo di 90° con l'asse mediano dello pneumatico.
- **Nervatura fascio o cerchietti:** sono fasce d'acciaio poste nel tallone, accomodano lo pneumatico sul cerchione e lo mantengono in posizione, evitando un suo eventuale sfilamento.
- **Riempimento:** generalmente è costituito da gomma ed è posto nella zona del tallone e del fianco per consentire un passaggio graduale dalla zona rigida del tallone a quella flessibile del fianco.
- **Rivestimento interno:** strato di gomma inserito all'interno degli pneumatici tubeless, studiato appositamente per evitare perdite d'aria.
- **Tallone o incavo del tallone:** strato di tela gommata che impedisce l'usura provocata dallo sfregamento del tallone contro il bordo del cerchio e che garantisce l'attrito necessario per evitarne la rotazione sullo stesso.



Schema di riconoscimento

Le caratteristiche fondamentali di uno pneumatico, scritte usualmente con marcature di codici impressi a caldo nella parte laterale dello stesso, sono:

- Dimensioni fisiche
- Caratteristiche prestazionali

- Caratteristiche costruttive
- Data di produzione

L'ordine in cui tali caratteristiche vengono indicate è il seguente:

T l / hl St d cM vM Sca

D e N sono indicate a parte, mentre Sca non è sempre indicato.

Con tali denominazioni si vuole indicare in particolare:

- T: Tipo dello pneumatico (P=passenger, per automobili) non obbligatorio in Europa
- l: Larghezza massima dello pneumatico, in condizioni di pressione e carico definite dalle norme, questa misura viene espressa in millimetri
- hl: Rapporto, espresso in forma percentuale, fra altezza della spalla e larghezza della sezione. Lo pneumatico si definisce ribassato quando tale rapporto è inferiore a 80, super-ribassato quando è inferiore a 45. Più piccolo è questo numero, migliore è la tenuta a scapito però del comfort. Se omesso è da considerarsi 80.
- St: Struttura riguardante la disposizione delle tele e indicata con una lettera, può essere radiale "R" ("ZR" nel caso lo pneumatico superi i 240 km/h) o diagonale (anche detto bias belted o convenzionale o a tele incrociate) "B" o "-"
- d: Diametro del cerchione (in pollici)
- cM: carico massimo ammissibile. È un indice di riferimento alla massa limite (in kg) consentita sulla singola ruota.

Esempio

P235/45R17 97W

- P indica che trattasi di uno pneumatico per autovettura ("P" di passenger).
- 235 - la larghezza è di 235 mm.
- 45 - il rapporto dell'altezza con la larghezza è del 45% - di conseguenza l'altezza è 105,75 mm.
- R - trattasi di pneumatico radiale.
- 17 - per cerchioni da 17 pollici.
- 97 - il peso massimo ammesso, in questo caso di 730 kg.
- W - per velocità massima di 270 km/h (167 mph).

La data di produzione viene identificata mediante tre cifre.

4.8 CERCHIONE

Il cerchione è l'elemento della ruota, che collega lo pneumatico al veicolo e può essere costruito in vari materiali:

- Acciaio a basso tenore di carbonio (in passato per i cerchioni, il mozzo e i raggi della bicicletta)
- Acciaio a più alto tenore di carbonio (fascia bassa autoveicoli)
- Acciaio legato (moto da fuoristrada, auto stradali o camion)
- Lega d'alluminio (maggiore impiego per i cerchi stradali dei motoveicoli e delle automobili).
- Lega di magnesio (moto stradali , minor peso)
- Fibra di carbonio (veicoli da competizione)

Tipologia:

- A raggi, il cerchione esterno è collegato al mozzo tramite i raggi, i quali variano per numero, spessore e incroci ("dritti", "primo incrocio", "secondo incrocio" o "terzo incrocio")
- A razze/stampato, questi cerchioni sono un elemento unico o scomponibile di metallo, con il cerchione esterno e il mozzo centrale in un unico elemento.

Il diametro del cerchio, per convenzione misurato in pollici, determina le misure degli pneumatici che si possono abbinare. Entro il limite del diametro totale della ruota completa (cerchione + pneumatico), con cerchi più grandi si possono usare pneumatici con spalla minore, il che aumenta la rigidità dello pneumatico, migliora l'impronta a terra e riduce le torsioni dello pneumatico in curva, fattore importante e vantaggioso nell'uso su asfalto, ma deleteria nell'uso fuori strada. Il canale del cerchio definisce la sede su cui viene montato lo pneumatico.



La larghezza è una semplice misura espressa in pollici, fondamentale per definire il comportamento con uno determinato pneumatico.

- In ambito automobilistico: Con una larghezza del cerchione e del battistrada uguali, si ha il miglior comportamento dello pneumatico e le sue spalle sono dritte.
- Nel caso il cerchione sia più stretto lo pneumatico tende a "bombarci" e avere un'impronta a terra minore, (comportamento pneumatici troppo gonfi); nel caso opposto, (comportamento pneumatici sgonfi).

L'Hump è la bombatura/gobba interna di rinforzo del canale che evita allo pneumatico di far crollare la spalla dentro al canale. La profondità del canale, chiamata anche pozzo è la parte cava del fondo del cerchione, di cui il profilo di questa cava varia dal tipo di profilo del canale, serve per facilitare le operazioni di montaggio dello pneumatico.

Maggiore sarà il pozzo e maggiore sarà la quantità d'aria contenuta tra pneumatico e cerchio, richiedendo meno attenzioni per il controllo della pressione degli pneumatici. Ogni cerchione ha una sede per la valvola pneumatica, a seconda del tipo di cerchio questa sede può essere più o meno grande.

4.9 GIUNTO MECCANICO

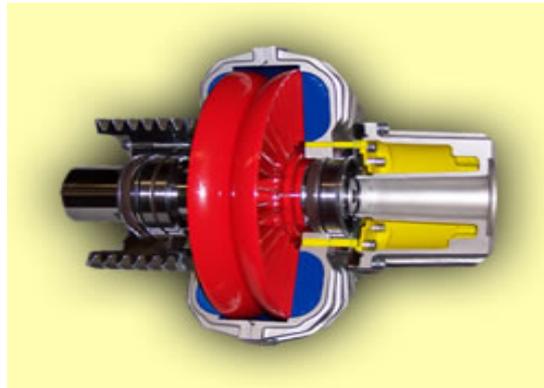
Un giunto è un dispositivo capace di rendere solidali tra loro due estremità d'albero in modo tale che l'uno possa trasmettere un movimento torcente all'altro.

Vi sono diversi tipi di giunti tra cui:

- giunto rigido: servono a collegare due alberi perfettamente coassiali, senza nessuna divergenza. Possono essere: a dischi, a manicotto, a gusci o a flange;
- giunto elastico: permettono grazie alla presenza di un elemento flessibile l'assorbimento delle vibrazioni torsionali che sono la principale causa delle rotture degli organi meccanici. Possono essere: a pioli, a collare, a molla, con inserti o per flex. Non hanno bisogno di lubrificazione ma periodicamente o su condizione bisogna cambiare gli elementi elastici;
- giunto a denti: permettono di avere un leggero disallineamento tra i due alberi ma rispetto ai giunti elastici possono trasmettere una coppia maggiore. Necessitano di una lubrificazione periodica;
- giunto articolato: permettono trasmissioni molto lunghe perché compensano le dilatazioni assiali. Il giunto cardanico è costituito da una crociera che unisce 2 forcelle ruotate di 90° l'una rispetto all'altra e permette ai due alberi di avere forti disallineamenti, ma la coppia trasmessa

non è costante e varia con andamento sinusoidale. Se si montano due giunti cardanici, uno dopo l'altro, sullo stesso asse, il giunto diventa omocinetico, cioè il sistema costituito dai due giunti trasmette una coppia costante; il giunto di Oldham permette la trasmissione del moto tra due alberi disallineati ma paralleli, e per sua natura è omocinetico;

- giunto idraulico:
- giunto di sicurezza:
- giunto viscoso.



CAPITOLO 5) OBIETTIVO DEL PROGETTO

STUDIO DI FATTIBILITA' DI UN MICROAEROGENERATORE CARRELLATO

Il progetto che andremo a studiare ha come obiettivo quello di trovare una soluzione di aerogeneratore ad asse orizzontale, che abbia come proprietà principale quella di poter produrre una potenza di 8500 W in condizioni di ventosità medie di 12m/s ed annesso carrello appendice per poterlo spostare con agilità anche su terreni sconnessi . La soluzione cercata oltre che produrre energia elettrica potrà, una volta messo l' aerogeneratore in posizione di riposo e smontato dai supporti, utilizzare il carrello appendice come strumento per trasportare merci. Per questo motivo, il nostro studio inizierà esaminando le caratteristiche e i dati tecnici di un carrello appendice con massa a pieno carico inferiore ai 1250 kg in quanto questa tipologia può essere utilizzata da qualsiasi utente munito unicamente di patente B. Ogni singola parte meccanica di seguito è stata creata attraverso il programma Cad per computer Windows SOLIDWORKS.

Questi saranno i fattori considerati:

- INGOMBRO
- EFFICENZA
- COSTI
- ESTETICA

5.1 VINCOLI PROGETTUALI NELLO STUDIO DELL' AEROGENERATORE

Si cercherà di realizzare una struttura compatta che possa eliminare tutti i costi dovuti a 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 quella di 4000mm della lunghezza e 1400 mm della larghezza di un pianale di un carrello appendice utilizzabile senza l' ausilio di patenti superiori. 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 altezza operativa. Saranno favoriti i collegamenti con l' utilizzo di perni per poter consentire un montaggio facilitato direttamente sul posto. Per evitare fenomeni di instabilità il carrello appendice sarà dotato di bracci telescopici per aumentarne la superficie (4000mm in lunghezza e 3500mm in larghezza) di contatto con il suolo, e la torre verrà vincolata a questi con funi d' acciaio.

Il pianale si trova ad un' altezza di 600mm dal suolo. La struttura dovrà essere il più leggera possibile, compatibilmente con i criteri di resistenza e dovrà ridurre al minimo le vibrazioni.

La potenza nominale di progetto dovrà essere di 8500W con un vento di 12 m/s che corrisponde secondo la "scala Beaufort" ad un vento moderato.

Non sarà previsto nessun intervento umano durante il funzionamento della turbina che dovrà operare continuamente ogni qualvolta il vento lo permetterà; saranno previsti interventi di manutenzione affinché l'aerogeneratore riesca a raggiungere una vita minima di 25 anni.

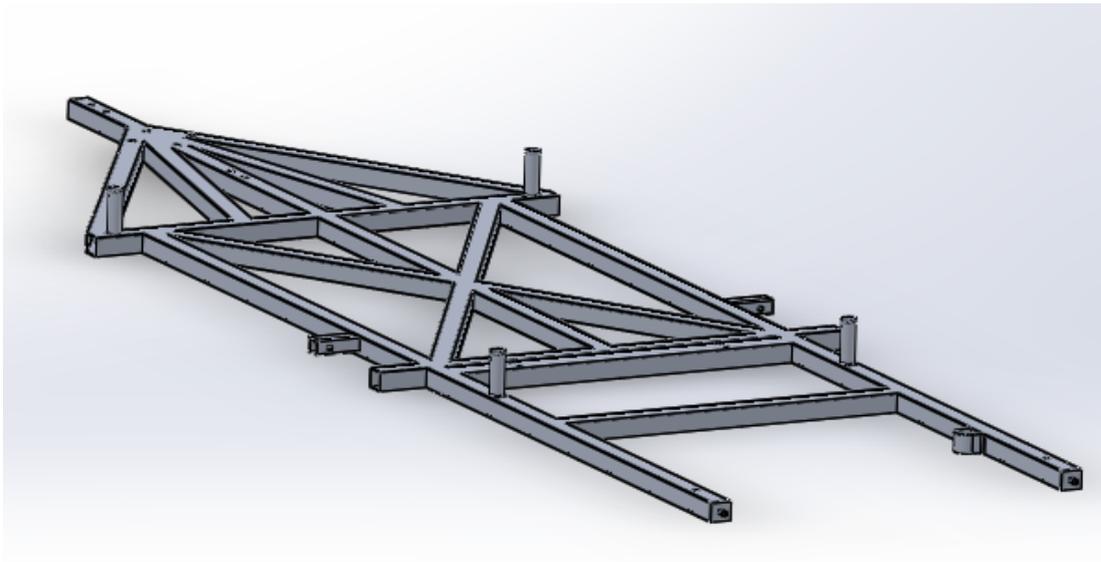
Le condizioni atmosferiche a cui la turbina garantisce un rendimento dell' 85% sono comprese tra -30°C e $+50^{\circ}\text{C}$.

Si cercherà di giungere ad un aspetto gradevole e il rumore dovrà essere di intensità trascurabile anche se l'installazione è preferibile lontano dalle residenze civili per non ridurre le prestazioni a causa di eventuali turbolenze che potrebbero generarsi dalla vicinanza. La potenza richiesta di 8500W ha un motivo preciso, infatti questo è il fabbisogno richiesto da poco meno di 3 abitazioni per poter utilizzare i più comuni elettrodomestici.

Questo sistema permette di garantire energia elettrica rinnovabile e pulita a una moltitudine di persone in qualsiasi luogo, ad esempio casolari in montagna, capanni da pesca, bagni al mare, abitazioni che ancora non sono state raggiunte dalla rete elettrica nel massimo rispetto dell'ambiente e della fauna.

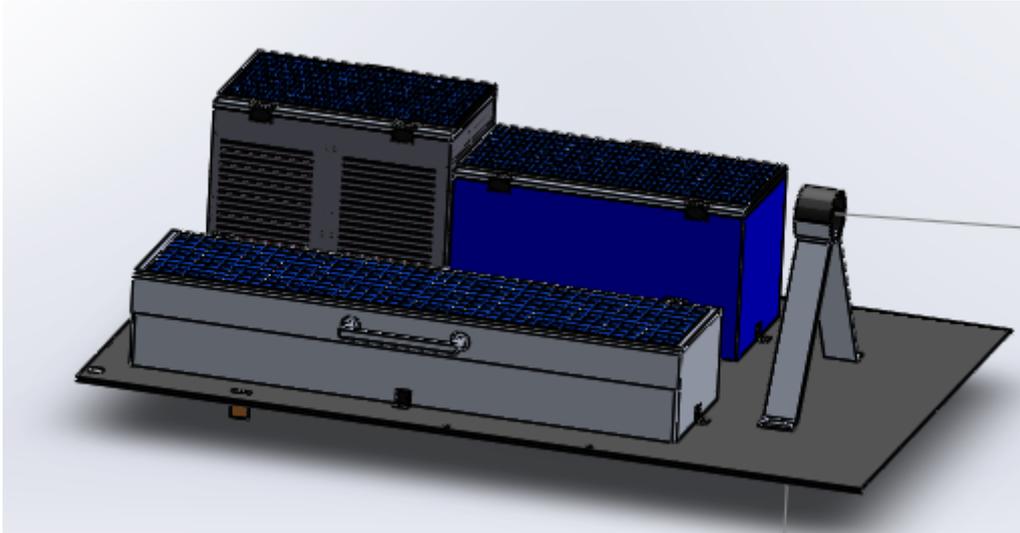
5.2 ANALISI DEI COMPONENTI

Per prima cosa occorre realizzare il telaio del carrello e renderlo idoneo, sia alla circolazione su strada sia a sorreggere il peso dell'aerogeneratore. Verrà realizzato con del tubolare in alluminio quadrato di sezione 60 mm per 60 mm di cartella 3 mm.

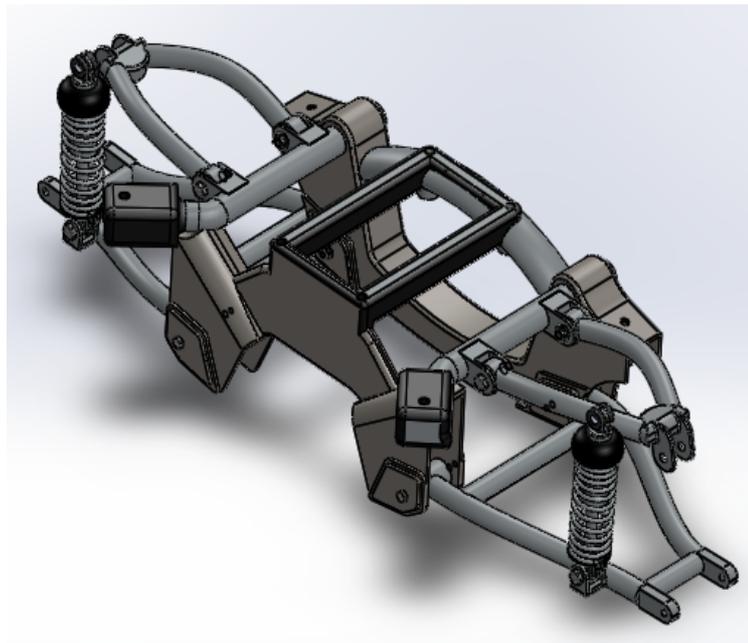


Telaio superiore in alluminio serie 7000 (peso circa 45 kg)

Sul telaio verranno fissate, con l' utilizzo di bulloni, le staffe per sorreggere i vari organi (come il supporto per il palo di sostegno dell'aerogeneratore in fase retratta) e una lamiera di alluminio ruvido di 2 mm serie 2000 da 18 kg opportunamente tagliata forata e piegata per dare alla struttura la rigidità necessaria per impedire qualora si salga sul carrello, per eventuali operazioni di manutenzione dell'aerogeneratore o per caricare merci di scivolare; quindi è possibile camminarci sopra.



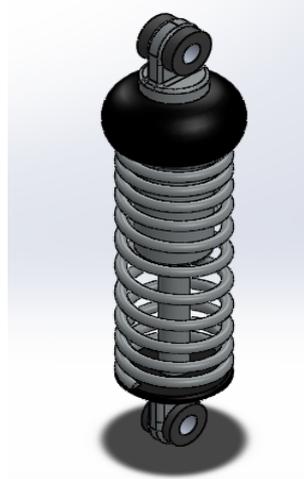
Al telaio viene inoltre collegata una struttura portante dell'asse posteriore progettata per consentire l'off-road, e con parti facilmente sostituibili per facilitare le operazioni di manutenzione e sostituzione dei pezzi.



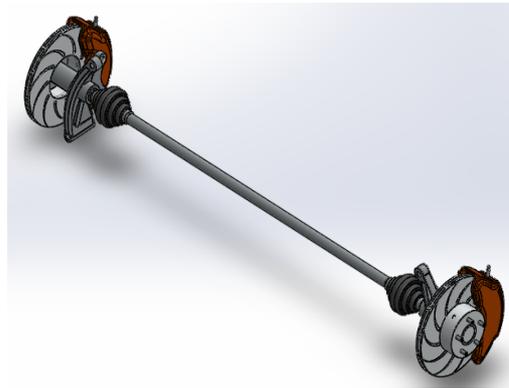
Tale struttura dal peso di 60kg costruita con alluminio della serie 7000, grazie all'elevata resistenza delle barre superiori (inferiori) dal peso di 5 Kg ciascuna e alla presenza di due ammortizzatori, permetterà una buona aderenza del carrello senza rischi di cedimenti strutturali e con un coefficiente di sicurezza pari a 5; i collegamenti sono effettuati tramite viti e perni di adeguata resistenza.

Nella figura seguente vediamo lo zoom dell'ammortizzatore che viene precaricato di circa 500 Kg per contrastare il peso totale di 1000 kg e viene inoltre settato un valore di compressione- espansione di 1 a 2 per permettere una buona guidabilità anche nei fuoristrada con un coefficiente di sicurezza pari a 4,5 per resistere ai danni strutturali a fatica.

Costituito in acciaio INOX e alluminio serie 7000 ,dal peso di 5Kg da alla struttura una buona rigidità. $F=-Ky=4905N$ ($500Kg \times 9,81 (m/s^2)$) La forza peso è uguale al coefficiente elastico della molla moltiplicata la differenza fra le distanze. In fase di compressione stabile l'ammortizzatore ha una lunghezza di circa 35 cm mentre quando è completamente scarico diventano circa 45 cm. Il che permette una buona espansione e compressione su di una buca di media entità.

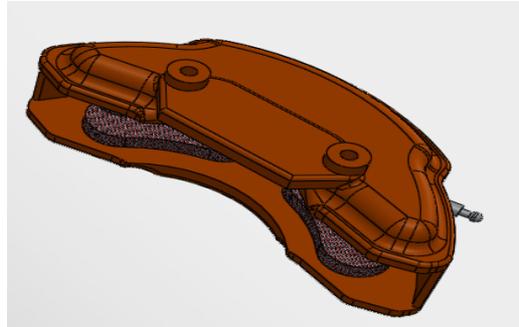


Il Telaio sarà collegato al mozzo (3Kg in acciaio) che a sua volta sarà fissato all'asse (acciaio Inox 15 Kg , lunghezza 1120mm) , progettato per resistere ad elevati carichi flessionali e torsionali, di seguito troviamo il rotore (5Kg) e i freni (6Kg). Sono presenti cuscinetti a sfera bloccati da ghiere; perni, viti e dadi ISO per permettere la stabilità del telaio e la normale rotazione dell'albero. Esso dal diametro di 40mm è sottoponibile ad una velocità massima (rotazione massima di circa) 120 (km/h) / 3,6=33,3 (m/s)..... x 1000=33333 (mm/s)/650(mm di diametro ruota)=51,2.....x60(s)=3075 (RPM) con un Coefficiente di sicurezza pari a 10.

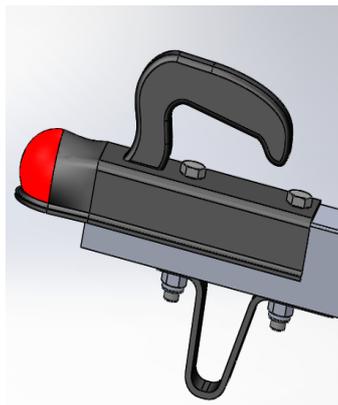


Nella figura seguente abbiamo lo zoom dei freni a disco dal peso ciascuno di 4Kg con una forza frenante da 4905 N per agevolare la frenata e bloccare il carrello in fase stazionaria. Le pastiglie (2Kg) con un coefficiente di attrito pari a 0,5 azionate in maniera idraulica premono contro il rotore dei freni creando così un momento avverso che va a decelerare il moto dell'intero veicolo . Quindi $4905(N) \times 0,5=2452 (N)$ (forza trasferita). Mentre la pressione sul disco del freno necessaria è

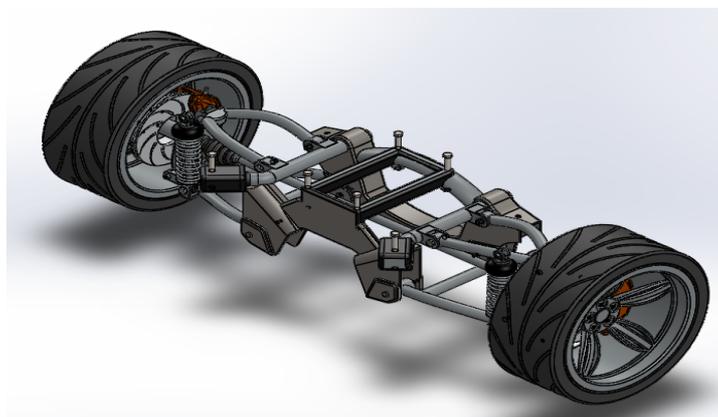
$P=F/S=4905(N)/17600(mm^2)=0,28$ (MPa= (la pressione è uguale alla forza diviso la superficie) che è la minima necessaria . Sovradimensionandoli il sistema freni dispone di una pressione totale di un 1 MPa. Il momento contrastante è di $M=Fxb= 2452(N) \times 0,75 (m)=1839(N \times m)$ (il momento è uguale alla forza per il braccio).



Il carrello sarà inoltre munito di un attacco in lega di acciaio (3Kg) che permetterà di agganciarsi al veicolo motrice (in figura); esso viene fissato al telaio grazie a due dadi e bulloni ed è capace di resistere in trazione ad una forza di 35000 N per poter avere un CS pari a 3,5 . Inoltre è poi presente in testa una luce led rossa per segnalare la presenza del veicolo.



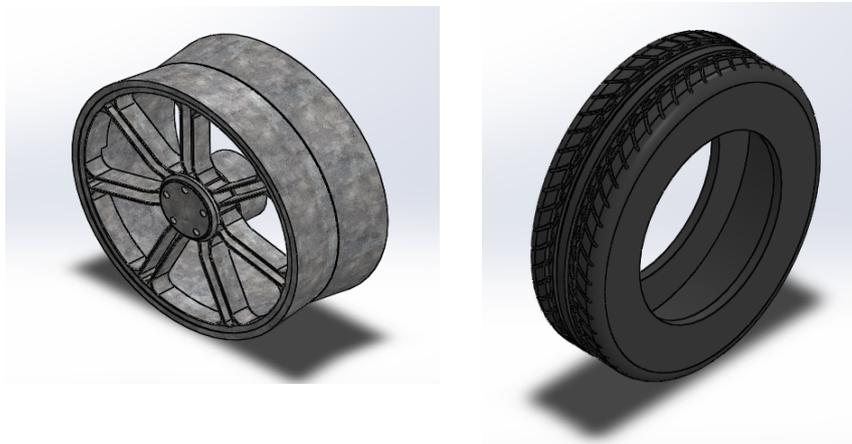
Per avere una buona aderenza il carrello sarà dotato di 2 ruote 650/35 R23 (45 Kg) che verranno fissate tramite dei bulloni al mozzo e al rotore del freno come in figura.



Inoltre la ruota è dotata di un cerchione a stella in lega di acciaio (36 Kg) e del relativo pneumatico in gomma (9 Kg) adatto sullo sterrato e sul bagnato grazie agli intagli che devono rimanere entro i 3mm di altezza per poter circolare secondo il codice della strada con una pressione interna di circa 5 atm come da manuale tecnico.

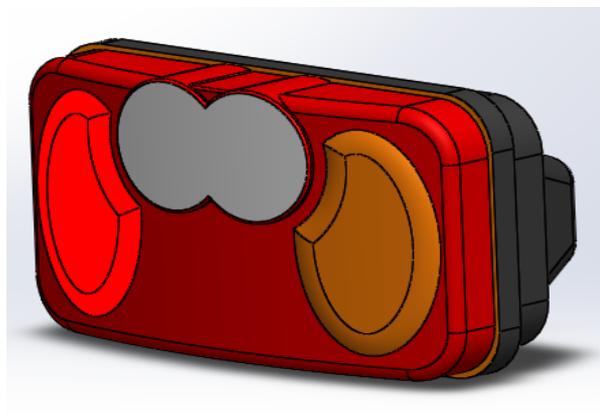


In figura un pneumatico e un cerchione differente che potranno essere scelti da un ipotetico futuro catalogo.



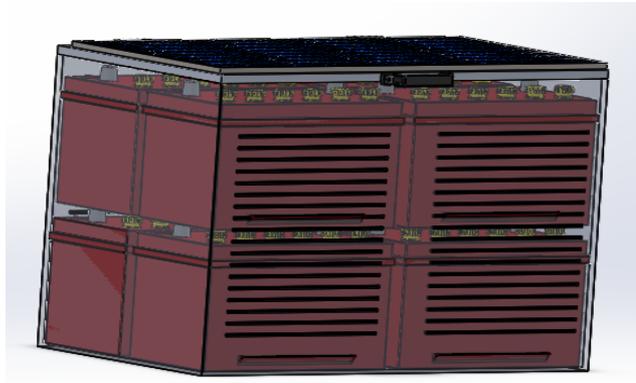
Il carrello sarà inoltre dotato della segnaletica luminosa necessaria ,laterale frontale e posteriore ed in particolare la posteriore completa di stop retro e freccia per segnalare efficacemente le manovre. Le luci sono al led e sono facilmente visibili anche in caso di nebbia.

(come in figura viene segnalata la frenata)

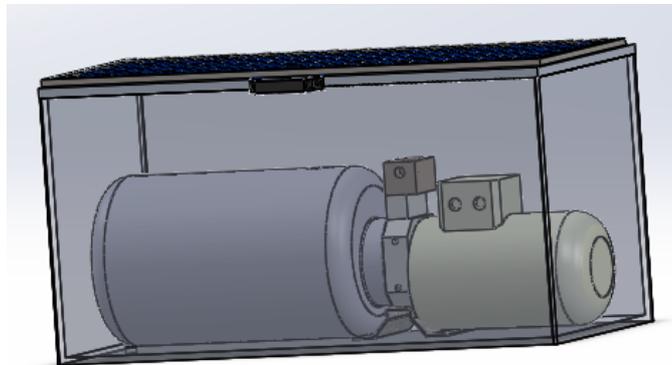


Il pianale è dotato di un gruppo accumulatore composto da 8 batterie da 24 V 80 A (18 Kg) che hanno lo scopo di immagazzinare l'energia nel caso in cui non si dispone di una rete in cui immettere il surplus di corrente elettrica generata dalla turbina (grazie alle agevolazioni di scambio di

energia che permette lo stato). Ciascuna delle capacità permette di fornire una potenza di 1,92 Kw.
 $P = VI$ (La potenza è uguale al voltaggio moltiplicato l'intensità di corrente) Quindi
 $24(V) \times 80(A) = 1920W = 1,92(Kw)$ per un totale di potenza nominale di 15 Kw che considerata l'efficienza del 75% è pari a circa 11,5 Kw. (in figura)

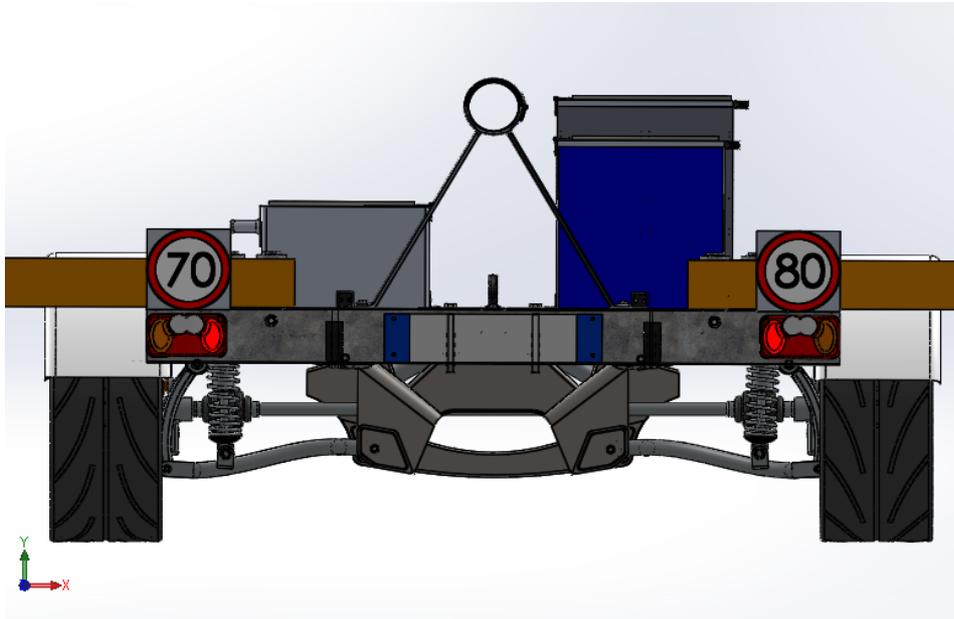


Viene predisposto anche un cassone per attrezzi dove poter caricare gli accessori e o valigie fino a un max di 250 kg, e un gruppo idraulico della potenza di 1KW che permetta l'azionamento degli stabilizzatori e l'innalzamento automatico del palo portante la turbina e la pala fino all'altezza di 5500mm.



Inoltre come si evidenzia bene dalle figure precedenti sono stati montati sopra ai coperchi dei tre contenitori, tre pannelli fotovoltaici che permetteranno la ricarica delle batterie anche in caso di velocità del vento nulla, grazie all'energia solare. L'insieme dei tre pannelli danno una potenza stimata media nominale di 0,8 KW che si vanno ad aggiungere agli 8,5 KW della turbina per un totale di 9,3 KW. Questo è uno stratagemma che combina le due tecnologie e permette una corrente elettrica più stabile e meno in fluenzabile. Anche per questi ultimi occorrerà passare per l'inverter dato che ci darà in uscita una corrente continua che dovremo convertire in alternata per l'utilizzo più disparato.

Il mezzo risulterà provvisto anche della segnaletica adeguata come targa, luci e limiti di velocità come da codice della strada (70 km/h strade secondarie , 80 km/h autostrada),



e dei parafanghi in plastica da 1,3 Kg opportuni per non generare schizzi d'acqua che potrebbero ridurre la visibilità di altri veicoli stradali così come prevede la relativa norma.

► **B**

DIRETTIVA DEL CONSIGLIO

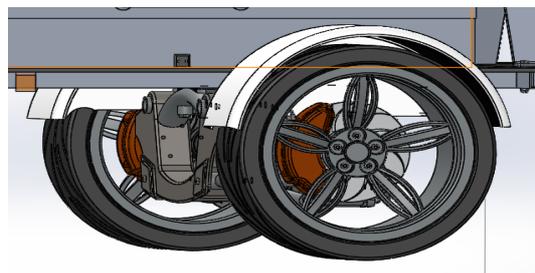
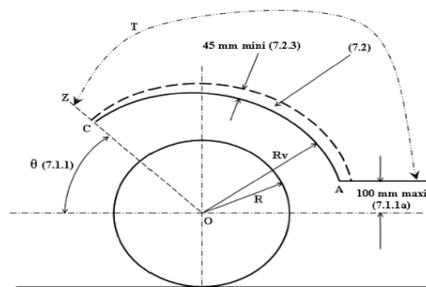
del 27 marzo 1991

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

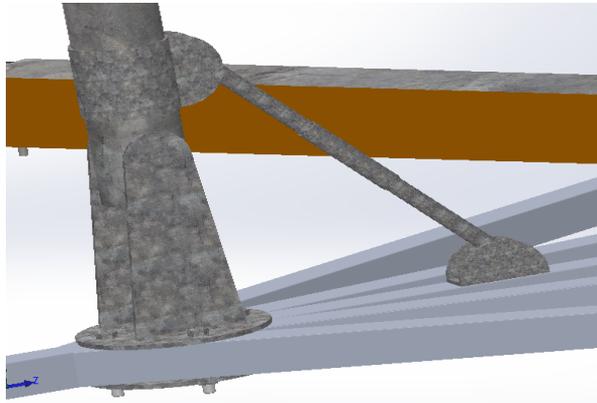
(91/226/CEE)

(GU L 103 del 23.4.1991, pag. 5)

Dimensioni del parafrango e del bordo esterno



Per garantire un buon fissaggio della torre, che sorreggerà l' aerogeneratore, verrà fissato al telaio una staffa opportunamente piegata e forata, che servirà a fare da perno per il sollevamento della torre. La staffa verrà ubicata all'estremità del carrello per poter sfruttare tutta la lunghezza consentita e per avere un buon punto di applicazione. La forza che deve generare il martinetto idraulico è di 250 Kg per poter permettere il sollevamento dell'aerogeneratore.

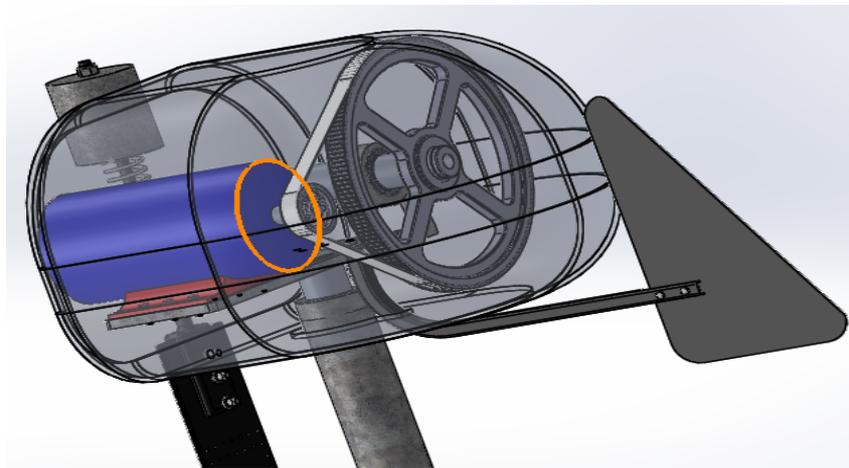


La torre sarà realizzata con un tubolare in acciaio galvanizzato di spessore 2mm di lunghezza totale 3000 mm e dal peso di circa 62 Kg alla quale verrà, attraverso una flangia, vincolato un pistone a semplice effetto in alluminio dotato di 3 sfilì. Questo sistema permetterà all'aerogeneratore di raggiungere e superare un'altezza di oltre 5500mm.



5.3 GENERALITÀ DELL'AEROGENERATORE

Dopo aver illustrato la realizzazione del carrello, si procede con la fase di progetto della turbina eolica. Per realizzare il nostro prototipo verrà installata una turbina eolica di facile reperibilità in commercio con potenza nominale 8,5KW con un vento medio di 12 m/s. È un prodotto realizzato in acciaio Galvanizzato e necessita di poca manutenzione, inoltre è dotata di un meccanismo anticavitazione che permette la rotazione in ogni direzione e, per la fase di chiusura dispone di un freno per il bloccaggio della posizione o per contrastare il momento giroscopico. Inoltre per non trasmettere a terra le vibrazioni che si verranno a creare in fase di esercizio della turbina gli organi meccanici verranno "isolati" interponendo tra i collegamenti metallici dei materiali plastici per smorzare le vibrazioni. Nella figura sottostante, si mostrano gli elementi principali.



In essa mancano alcuni componenti che non verranno trattati, perchè sono inseriti all'interno della protezione dell'alternatore (colore blu e rosso), come ad esempio il freno per non superare la velocità limite di rotazione dell'albero.

La monopala e il contrappeso sono collegati all'albero primario che ruota ad una velocità di circa 300 rpm ed esso è vincolato con i relativi cuscinetti montati e bloccati assialmente da una ghiera. Gli appoggi sono sollecitati da una spinta aerodinamica e da un momento giroscopico, quindi sono stati sovradimensionati. 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. Per minimizzare la resistenza all'aria è stata aggiunto un rivestimento in fibra di carbonio. La trasmissione è del tipo a cinghia dentata, con un rapporto di moltiplicazione pari a 5. La puleggia veloce (1500 rpm) attaccata all'albero dell'alternatore, permettere al generatore un eventuale collegamento alla linea elettrica. Per provvedere all'orientamento della turbina al variare della direzione del vento è stato inserito un timone. Internamente all'impianto troviamo anche un Inverter per poter disporre di corrente alternata alla frequenza di 50HZ e voltaggio 220V (Un'inverter è un apparecchio elettronico in grado di convertire una corrente continua in una corrente alternata).

DATI TECNICI DELL' AEROGENERATORE

ANALISI DELLE CARATTERISTICHE

velocità di partenza del rotore	3m/s
velocità del vento inizio produzione	3.5m/s
velocità del vento di massima resa	12m/s
velocità del vento a cui si attiva il sistema di sicurezza	30m/s
voltaggio DC dal controller rotore	48V
velocità rotore giri al minuto	300 r.p.m
diametro del rotore	6000mm
efficienza generatore	0.85
peso	190 kg
voltaggio corrente alternata in uscita	220V alla frequenza di 50Hz

La pala

La pala, dal peso di 15 Kg, è costituita da 10 lamiera di alluminio sovrapposte con spessore 1 mm l'una, lunghezza fino a 3000 mm e larghezza 200mm, che comportano un diametro della turbina di 6 metri. Tramite un taglio laser si sagomano i profili delle lamiere e si predispongono i fori per la rivettatura. Le lamiere di 1 mm sovrapposte garantiscono la giusta leggerezza della struttura, pur conservando la dovuta resistenza alla spinta aerodinamica che muove la pala . (coefficiente di sicurezza elevato CS=15). Inoltre per equilibrare la forza centripeta generata dalla pala viene inserito un ammortizzatore con un contrappeso in acciaio galvanizzato pieno dal peso di circa 35 Kg .

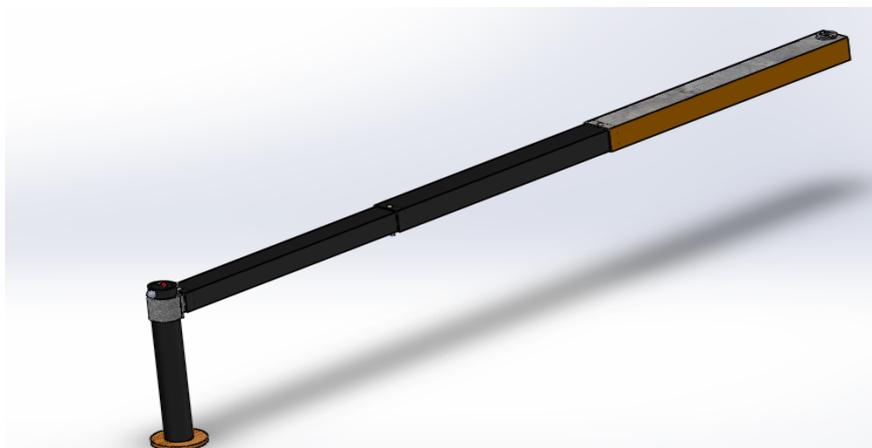
$F_c = M(V_t^2)/r$ La forza centripeta che è uguale in modulo alla forza centrifuga che è data dalla moltiplicazione della massa M per la velocità tangenziale al quadrato diviso il raggio riferito al baricentro del corpo. (nel nostro caso metà pala 1,5 m) La velocità tangenziale è uguale alla velocità angolare moltiplicata il raggio . Considerando che il nostro albero ruota a circa 300 RPM e che la velocità angolare è uguale a $2\pi/T$ (π = pigreco e T il periodo) abbiamo che il nostro periodo è di $1/5 = 0,2$ s e la nostra velocità angolare risulta essere di $31,5 (s^{-1})$.

Di conseguenza la forza centripeta è uguale a $15 (Kg) \times (31,5^2(s^{-1})) \times 1,5(m) = 22326(N)$. Quindi in fase ottimale a 300 RPM il nostro contrappeso riesce tranquillamente a controbilanciare la forza centrifuga con un raggio di 0,65 (m), infatti $35(Kg) \times (21,5^2(s^{-1})) \times 0,65(m) = 22326(N)$ con velocità del vento ottimale di 12 (m/s). Mentre a circa 30 (m/s) entra in funzione il freno , proprio perchè non è più sufficiente il contrappeso per il bilanciamento e si rischierebbe la rottura dell'impianto.

to. Per quanto riguarda invece la potenza max nominale dell'aerogeneratore, abbiamo che è $P_{max}=k \rho A V^3$, dove $k=(8/27)$ è un coefficiente che tiene conto dell'efficienza della pala e della conversione di energia meccanica in elettrica, ρ è la densità aria standard a quota zero di $1,225 \text{ (Kg/m}^3)$ A la sezione della turbina ($A=r^2 =3x3x =28,26 \text{ m}^2$) e V è la velocità del vento ottimale (12m/s). La potenza specifica su m^2 la calcoliamo dalla formula generale della teoria dell'eolico ed è uguale a $1058(\text{W/m}^2)$. Di conseguenza la potenza massima disponibile è di $8,85 \text{ Kw}$.

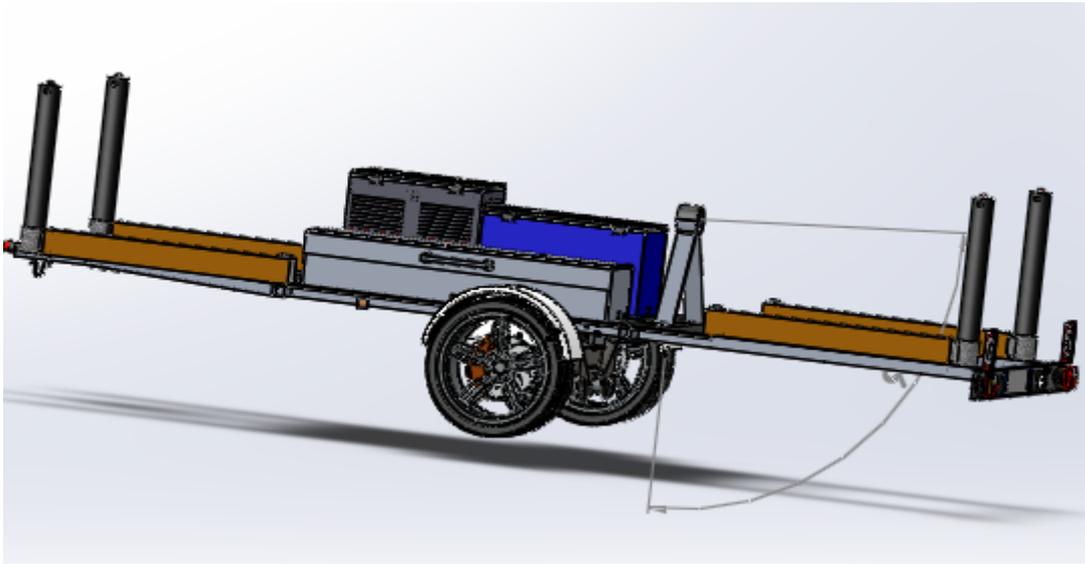


Stabilizzatori



Per poter mantenere la stabilità statica e dinamica in fase di produzione di energia vengono aggiunti gli stabilizzatori (64 Kg) che sono realizzati con acciaio galvanizzato (compresi altri materiali vari

come legno ecc.) e che con una lunghezza della gamba di 3500mm garantiscono la sufficiente rigidità, una buona resistenza all'usura degli agenti atmosferici. Cosa ancora più importante è che aumentano la superficie della base di appoggio attraverso i quattro vincoli che diminuiscono l'effetto del momento flettente sul palo dovuta alla forza aerodinamica del vento e della pala stessa, rendendo di fatto il nostro carrello stabile fino ad una velocità del vento di circa 100 m/s . Gli stabilizzatori, di sezione quadrata, si ritraggono in fase di chiusura con meccanismo telescopico formato da 3 elementi grazie alla pompa idraulica, mentre in posizione estesa vengono bloccati tramite perni. I pali di sostegno dei 4 bracci si sollevano con un semplice movimento di rotazione. Il bloccaggio al telaio è ottenuto per mezzo di rosetta e anello seeger serie pesante per supportare il peso del carrello. Inoltre hanno una luce di posizionamento che si accende in fase di movimento e, lungo le bande laterali, hanno una vernice riflettente per renderli ben visibili. Lo stabilizzatore in fase di trasporto risulta estremamente compatto e maneggevole e per evitarne l'apertura durante il moto, si blocca la rotazione tramite perno.



Per aumentare ancora la stabilità ed impedire alla torre eventuali oscillazioni verranno fissati alla flangia 4 occhielli in acciaio sui quali possono essere agganciati dei cavetti di diametro 3 mm che poi saranno ancorati agli stabilizzatori.

5.4 ANALISI DEI COSTI DEL PROGETTO

ANALISI DEI COSTI CARRELLO APPENDICE		
PARTE MECCANICA:	COSTO UNITARIO:	QUANTITA' :
Ruote Continental 325/35 R23 Z XL	300 euro	2
Kit pastiglie dei freni	66 euro	1
Dischi dei freni Brembo	80 euro	2
Ammortizzatore a molle	100 euro	2
Mozzo ruota	50 euro	2
Asse	100 euro	1
Pompa Idraulica	300 euro	1
Batteria	150 euro	8
Pannello Fotovoltaico	150 euro	1
Casse contenitrici (3)	50 euro	1
Telaio misto, stabilizzatori e parti varie	1200 euro	1
Impianto idraulico ed elettrico (cavi e tubazioni comprese)	500 euro	1
Pianale	200 euro	1
Viti,dadi,bulloni,perni ecc..	80 euro	1
Luce posteriore	30 euro	2
Trave Posteriore completa	100 euro	1
Gancio Carrello	55 euro	1
Accessori di Fissaggio vari	105 euro	1
TOTALE COSTO CARRELLO APPEN- DICE	5226 euro	

ANALISI DEI COSTI MICROAEROGENERATORE		
PARTE MECCANICA:	COSTO UNITARIO:	QUANTITA'
		:
Controller Generatore eolico	1420 euro	1
Alternatore 10 Kw Bosch	680 euro	1
Turbina eolica	1500 euro	1
Pala eolica	350 euro	1
Dispositivi di controllo (imbardata, velocità rotazione ecc.)	750 euro	1
Torre tubolare	400 euro	1
Inverter	1840 euro	1
TOTALE COSTO MICROAEROGENERATORE	6940 euro	

I costi di alcune parti già esistenti in commercio sono state prese direttamente da catalogo, mentre quelle parti che necessiterebbero di una certificazione sono stati ipotizzati in base alla lavorazione e il materiale stesso. In totale l'intero progetto ha un costo di vendita al pubblico pari a 12.166 euro (IVA inclusa) con un ricavo medio stimato del 25% su ogni pezzo venduto (a parte la certificazione).

In compenso avremo diritto agli incentivi statali riguardanti l'impianto fotovoltaico che diminuiranno di un altro 30% il costo per il cliente nel caso in cui verranno accettati dall'ufficio competente. La manutenzione ordinaria ed altri costi di gestione, sono assolutamente trascurabili.

5.5 ANALISI DEI PESI DEL PROGETTO

ANALISI DEI PESI MICROAEROGENERATORE CARRELLATO		
PARTE MECCANICA:	PESO:	QUANTITA' :
Telaio Tubolare in alluminio	44 Kg	1
Telaio Misto scomponibile	(57 Kg)	1
Pianale	18 Kg	1
Turbina eolica	190 Kg	1
Pala eolica	(15 Kg)	1
Palo tubolare di sostegno della pala	66 Kg	1
Batteria	18 Kg	8
Pannello fotovoltaico	5 Kg	1
Freni a disco	(6 Kg)	2
Stabilizzatore laterale	64 Kg	4
Assieme Posteriore	180 Kg	1
Parti varie (Attacchi , flange, tubazioni, cavi elettrici ecc.)	98 Kg	1
TOTALE PESO MICROAEROGENERATORE CARRELLATO (tra parentesi ci sono dei pesi già considerati nel calcolo)	1000 Kg	

Il peso di circa 1000 kg permette all'utente di trasportare altre tipologie di merci (bagaglio ecc.) fino ad un massimo di 250 Kg. Un carrello come questo è decisamente pesante, ma utilizzando materiali con un peso specifico inferiore avrebbe comportato un aumento dei costi considerevole. I vari pesi sono stati calcolati sfruttando la funzione interna a SOLIDWORKS proprietà di massa.

CAPITOLO 6)

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

6.1 Considerazioni sul progetto

L'aerogeneratore dello studio presentato sviluppa una potenza di circa 8,5 kW con il rotore ad una velocità di 300 rpm, in condizioni di ventosità media di 12 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, anche in una zona deserta e piena di avvallamenti grazie alla struttura portante rinforzata e dotata di ammortizzatori.

L'aerogeneratore si posiziona sempre in direzione del vento garantendo la massima produzione di energia possibile grazie a diversi sistemi di controllo (imbardata, ecc.) e in caso di ventosità elevata l'impianto frenante entra in azione sulla turbina, 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. Inoltre è stato inserito un impianto fotovoltaico dalla potenza nominale di 0,8 KW per ridurre al minimo i momenti di produzione nulla di energia. E' stato inserito un gruppo di batterie sufficientemente capienti da estrarre sempre circa la stessa potenza dall'impianto per un periodo di circa 8 ore. Attaccandosi alla rete dal controller della turbina è possibile effettuare uno scambio sul posto di energia, proprio per sfruttare gli incentivi statali per le risorse rinnovabili pulite.

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, turistico. Per questo motivo nella ideazione, oltre all'efficienza, si è tenuto strettamente conto di fattori quali ingombri , costi, pesi e qualità costruttiva che permetta una vita dell'impianto sui 25 anni , grazie all'ordinaria manutenzione.

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

- adattare al carrello un sistema antifurto per preservare l'oggetto e renderlo più sicuro.
- Utilizzare una bipala o tripala pieghevole data la sua efficienza maggiore rimanendo con le giuste dimensioni.
- Irrobustire il palo di sostegno e tramite un impianto idraulico più sofisticato aumentare la sua altezza insieme al diametro del rotore.

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.

Bibliografia

- Appunti dal corso di Controlli Automatici;
- Appunti dal corso di Elettrotecnica;
- Appunti dal corso di Disegno Assistito al Calcolatore;
- Appunti dal corso di Sistemi Energetici;
- Appunti dal corso di Propulsioni Aerospaziali;
- Appunti dal corso di Aerodinamica;
- Appunti dal corso di Fisica Generale;
- Appunti dal corso di Fisica Generale;
- 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;
- L. Drei, *Tesi di laurea: Studio di fattibilità di un microaerogeneratore mobile*, Università di Bologna, 2012;
- V. Fiore, *Tesi di laurea: Studio ed ottimizzazione di un microgeneratore monopala*, Università di Bologna, 2012;
- Desiré Le Gouriers, *Energia eolica, teoria, progetto e calcolo pratico degli impianti*, Ed. Masson, 1985;
- 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;
- Sito web: Wikipedia, Google (immagini) ecc.