

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

---

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA

CON SEDE A CESENA

Classe 10

CORSO DI LAUREA

IN INGEGNERIA MECCANICA

ELABORATO FINALE DI LAUREA in

DISEGNO TECNICO ASSISTITO DAL CALCOLATORE

**STUDIO DI FATTIBILITA' DI UN PICCOLO AEROGENERATORE  
CARRELLABILE**

Candidato:

LUCA DREI

Relatore:

Chiar.mo LUCA PIANCASTELLI

---

Anno Accademico 2011-2012



## INDICE

<b>1. PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2. INTRODUZIONE</b>	<b>2</b>
<b>3. FONTI ENERGETICHE NON RINNOVABILI</b>	<b>5</b>
3.1 Petrolio	6
3.2 Carbone	7
3.3 Gas Metano	8
3.4 Energia Nucleare	8
<b>4. FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI</b>	<b>10</b>
4.1 Energia idroelettrica	11
4.2 Energia solare	14
4.3 Energia geotermica	16
4.4 Energia dal mare	17
4.5 Energia da biomasse	18
4.6 Energia eolica	20
<b>5. ANALISI DELLE TIPOLOGIE DI TURBINE</b>	<b>25</b>
5.1 Turbine ad asse orizzontale	25
5.2 Portanza	29
5.3 Tipologie di rotori	32
5.4 Turbine ad asse verticale	34
5.5 Turbina Savonius	36
5.6 Panemone	38
5.7 Turbina Darrieus	39
5.8 Orizzontale e verticale a confronto	43
5.9 Fattori positivi nell'utilizzo delle turbine	45
5.10 Fattori negativi nell' utilizzo delle turbine	46
5.11 Costi di installazione	47

<b>6. MODELLO MATEMATICO</b>	<b>49</b>
6.1 Cenni di fluidodinamica	49
6.2 Principio di continuità	50
6.3 Teorema di Bernoulli	51
6.4 Forza esercitata dal vento su un profilo	52
6.5 Potenza messa a disposizione dal vento	55
6.6 Influenza dell' altezza del rotore	57
6.7 Limite di Betz	59
6.8 Ipotesi alla base della teoria di Betz	61
<b>7. OBIETTIVI DEL PROGETTO</b>	<b>69</b>
7.1 Studio di fattibilità di un piccolo aerogeneratore carrellabile	69
7.2 Vincoli progettuali nello studio dell' aerogeneratore	70
7.3 Analisi dei componenti	72
7.4 Conversione meccanica-elettrica	75
7.5 Generatore di corrente	76
7.6 Moltiplicatore di giri	80
7.7 Dimensionamento dei pistoni	81
7.8 Considerazioni generali sui profili alari	86
7.9 Componenti per la realizzazione del progetto	90
7.10 Dati tecnici dell' aerogeneratore	93
7.11 Valutazione di stabilità	94
7.12 Analisi dei costi	95
<b>8. CONCLUSIONI</b>	<b>96</b>
8.1 Considerazioni sul progetto	98
8.2 Possibilità di sviluppo	99
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>100</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>101</b>



# PREMESSA

La presente tesi mira a realizzare un aerogeneratore della potenza di 2000 W che possa essere carrellabile quindi facilmente trasportabile, e semplice da installare.

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

Gli elementi che compongono il nostro progetto grazie al loro dimensionamento hanno il vantaggio di iniziare la produzione dell'energia con venti di bassa intensità (3 m/s), con livelli di rumore talmente bassi che possono essere considerati trascurabili e date le dimensioni e gli ingombri un contenuto impatto ambientale.

Inoltre vi è la possibilità di poter smontare l'aerogeneratore dal carrello qualora non lo si voglia utilizzare per la produzione di corrente elettrica, ma lo si voglia utilizzare come carrello appendice per il trasporto di merci.

La turbina eolica, dovrà avere un aspetto gradevole, massimizzare le prestazioni ed essere in grado di competere con quelle che attualmente dominano il mercato.

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

L'aerogeneratore potrà alimentare utenze isolate come ad esempio sistemi di telecomunicazioni, stazioni di pompaggio, utenze rurali site all'interno di isole.

La produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili viene promossa dal decreto legislativo n. 387 del 29/12/2003. Tale decreto dà indicazioni affinché tutti gli impianti che hanno una potenza non superiore ai 20000W abbiano la possibilità di connettersi alla rete con la modalità di "scambio sul posto".

Questo servizio permette di minimizzare 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 dovrà effettuare ogni anno un conguaglio tra l'energia prelevata dalla rete e quella immessa in rete dal cliente.

# INTRODUZIONE

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

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

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

Proprio per garantire la sopravvivenza del pianeta, assieme alla necessità di assicurare un più equo sviluppo sociale ed economico, nel 1997 nella città giapponese di Kyoto, i paesi industrializzati responsabili di oltre il 70% delle emissioni di gas serra, hanno definito un trattato internazionale riguardante il riscaldamento globale, detto protocollo di Kyoto, che individua esplicitamente le politiche e le azioni operative che si dovranno sviluppare e stabilisce tempi ed entità della riduzione delle emissioni di gas serra.

Gli stati si sono impegnati a perseguire un modello di sviluppo sostenibile che sia in grado di soddisfare i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la possibilità alle generazioni future di soddisfare i loro.

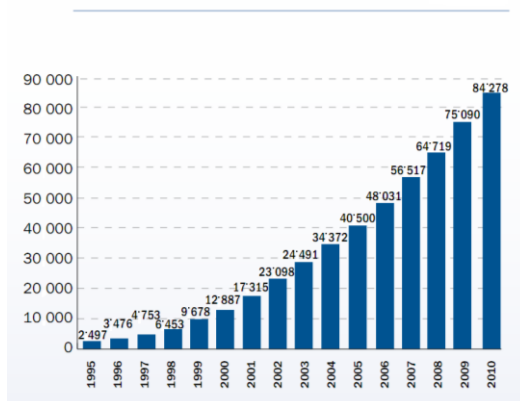
I paesi coinvolti hanno attribuito alle fonti rinnovabili un ruolo sempre più strategico nelle scelte in ambito energetico, sia nel tentativo di ridurre la dipendenza economica e politica dai paesi fornitori di combustibili fossili, sia per far fronte alla loro esauribilità e alle diverse emergenze ambientali.

La produzione di energia elettrica tramite combustibili fossili è una delle cause di emissione di anidride carbonica nell'atmosfera ma non è l'unica; l'utilizzo di fonti rinnovabili nel settore elettrico non potrà risolvere il problema ma può contribuire in modo significativo a una sua soluzione.

L'eolico, in questi termini, è una tra le risorse rinnovabili più economiche e si è affermato come uno dei migliori candidati per un futuro sostenibile. Per molti stati rappresenta un buon punto di partenza, utile per l'avvio ad una conversione verso l'impiego di energie pulite anche se non può essere l'unica risorsa di elettricità data la variabilità del vento.

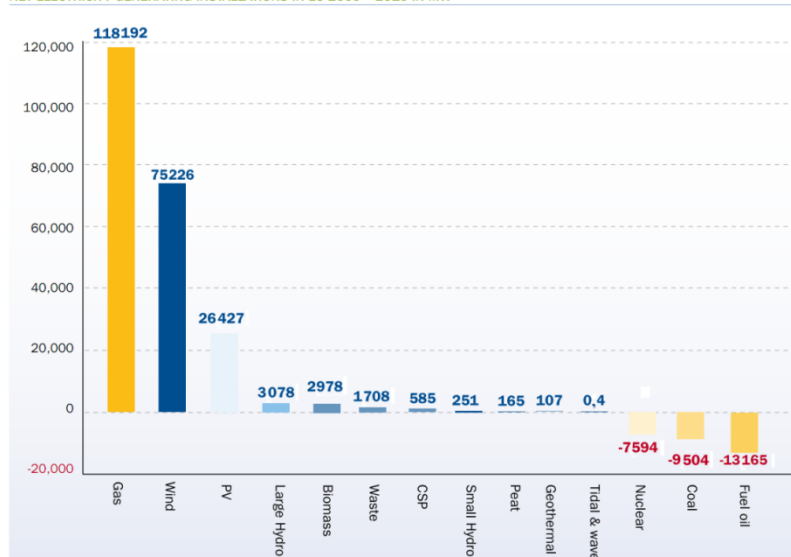
Nel grafico si può osservare quale sia stata la crescita dell'eolico in Europa (espressa in MegaWatt) negli ultimi 15 anni mentre nella seconda figura si mostra quale sia la tendenza europea negli ultimi 10 anni (sempre espressa in MegaWatt) nei confronti dello sviluppo o dismissione delle centrali elettriche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

CUMULATIVE WIND POWER INSTALLATIONS IN THE EU IN MW





NET ELECTRICITY GENERATING INSTALLATIONS IN EU 2000 – 2010 IN MW



Nel corso del 2012 si sta seguendo ancora il trend evidenziato nel grafico, infatti l'incremento nell'opinione pubblica degli effetti negativi della dipendenza da una risorsa in esaurimento come il petrolio e dalle rinnovate paure sul nucleare dati i recenti e drammatici eventi accaduti in Giappone hanno già mostrato come alcune nazioni, in primis la Germania, stiano chiudendo le proprie centrali nucleari.

Inoltre l'eolico, come anche il solare, pur avendo la limitazione di produrre energia in modo non continuativo e la necessità di rilevanti estensioni di territorio non provocano effetti irreversibili sull'ambiente e il ripristino delle aree utilizzate non ha costi eccessivi.

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

# **FONTI ENERGETICHE NON RINNOVABILI**

L'energia è alla base delle questioni più pressanti sul panorama internazionale. Le fonti fossili sono concentrate in poche aree del mondo ed il loro controllo è causa di tensioni e guerre. Il loro uso (causa principale dell'inquinamento e dell'effetto serra) mette a rischio la sopravvivenza non solo degli ecosistemi, ma anche della specie umana.

Le fonti fossili sono costituite da petrolio, carbone e metano. La loro combustione genera l'82% dell'energia usata oggi nel mondo.

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

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

Dobbiamo essere consapevoli che il loro uso è la fonte principale del nostro benessere e non si potrà interromperlo se non in modo graduale. Il loro impiego è, per altro, causa di alcuni dei problemi più importanti che l'umanità si troverà ad affrontare nel prossimo futuro, ovvero l'effetto serra e l'inquinamento atmosferico che miete milioni di vittime all'anno in tutto il pianeta.

# PETROLIO

Il 38% dell'energia consumata oggi nel mondo deriva dal petrolio, il suo uso è alla base del sistema dei trasporti ed è indispensabile anche nel settore dell'industria pesante, del riscaldamento, della produzione elettrica e nella chimica.

Il suo utilizzo è quindi fondamentale, ma i problemi legati ad esso impongono la sua rapida sostituzione con altre forme di energia.

Non solo, si stima che la sua produzione, agli attuali ritmi di consumo, inizierà a declinare molto presto, tra 10-30 anni.

Tutto questo ci crea non pochi problemi di drammatica entità: dal prezzo che aumenta sempre più, pesando seriamente sulle economie, alla crescita sempre più seria dell'instabilità politica, sociale ed economica nelle poche aree in cui è ancora abbondante (tensioni e ingerenze internazionali, guerriglie e guerre vere e proprie).

Dalla Colombia all'Africa centrale, dal Venezuela al Medio Oriente e all'Asia centrale, la presenza di abbondanti riserve petrolifere ha cessato di essere una fonte di ricchezza per gli abitanti di questi Paesi per diventare una croce, fonte di sofferenza e morte per chi su queste ricchezze siede.

Ridurre velocemente l'uso di petrolio non è quindi una questione semplicemente ambientale o economica, ma etica, perché non è ammissibile far finta che dietro alla comodità di usare l'auto per il più piccolo spostamento non vi sia chi muore a causa della benzina che la fa andare.



# CARBONE

Il carbone produce il 24% dell'energia consumata nel mondo. E' stato alla base della rivoluzione industriale ed è oggi usato soprattutto per produrre elettricità nell'industria pesante. Il carbone ha due vantaggi rispetto a petrolio e metano: le sue riserve sono abbondanti e costa poco.

Tuttavia, essendo costituito quasi interamente da carbonio, è il combustibile che produce più anidride carbonica per unità di energia prodotta e più polveri sottili, ossidi di zolfo (la principale causa delle piogge acide) ed altri inquinanti.

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

**Problemi sociali:** Oltre alle conseguenze sanitarie legate all'inquinamento, ogni anno migliaia di minatori muoiono nelle miniere per crolli ed esplosioni dovute spesso alle condizioni di sicurezza assenti.

**Problemi economici:** Vanno osservati due aspetti, da un lato, se come si diceva il carbone costa poco, questo è dovuto ai Paesi dove si estrae, infatti estrarre il carbone costa poco dove la manodopera è a buon mercato, gli standard di sicurezza nelle miniere sono minimi, i diritti sindacali dei lavoratori sono pochi o inesistenti e la normativa ambientale inesistente (non a caso la produzione di carbone in Europa Occidentale e nel Nord America ha iniziato a declinare dagli anni '70 e oggi i principali produttori sono Paesi in via di sviluppo).

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

## **GAS METANO**

Infine c'è il metano, usato oggi per generare il 20% dell'energia, soprattutto nel settore elettrico, del riscaldamento ed in cucina. Il metano tra tutti i combustibili fossili è certamente il più pulito, la sua combustione genera quantità di sostanze inquinanti enormemente più basse di quelle causate da carbone e petrolio. Esso è anche il combustibile fossile che produce meno anidride carbonica. Purtroppo però è costoso e la sua disponibilità è di poco maggiore di quella del petrolio, per cui nemmeno questa si può considerare la soluzione definitiva ai problemi energetici.

## **ENERGIA NUCLEARE**

Le centrali atomiche, quando funzionano correttamente, non producono polveri, gas serra o altre sostanze inquinanti "comuni". Si producono però scorie radioattive nella preparazione del combustibile nucleare, nel suo utilizzo e nel suo smaltimento.

Le scorie sono materiali che emettono radiazioni pericolose per la salute dell'uomo e di tutti gli altri esseri viventi.

Le scorie non sono radioattive per sempre e, dopo un certo tempo, diventano innocue. Anche se gran parte delle scorie cessa di essere pericolosa dopo pochi anni o dopo pochi decenni, una piccola percentuale di esse ha una vita lunghissima ed è pericolosa per centinaia di migliaia di anni.

L'uomo sa costruire dei contenitori dove sistemare le scorie senza che ne fuoriescano radiazioni, ma non è capace di costruirne che durino centomila anni. Il problema del nucleare non ha ancora una soluzione, queste scorie vengono depositate vicino alle centrali nucleari o in depositi sotterranei.

Negli impianti nucleari sono spesso successi dei piccoli incidenti che hanno portato alla fuoriuscita di sostanze radioattive, con vittime e contaminazione dell'ambiente.

Ma questi piccoli incidenti non sono il problema più serio.

Il nucleo di una centrale nucleare deve contenere una grande quantità di combustibile che si consuma lentamente, se la reazione sfugge di controllo a causa di un guasto e il combustibile comincia a reagire più velocemente del dovuto, la temperatura nel reattore può salire fino a farlo scoppiare e/o fondere.

A quel punto spegnere la reazione è difficilissimo e la quantità di materia radioattiva che si può disperdere nell'ambiente, anche a grande distanza, è molto più grande di quella causata da una bomba atomica.

L'uso dell'energia atomica produce scorie pericolose per migliaia di anni, che non sappiamo smaltire e ci espone al rischio di incidenti che possono rendere inabitabili regioni immense del pianeta.

## **FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI**

Si dicono rinnovabili quelle fonti di energia “non esauribili”. Ciò significa che il loro tempo di rigenerazione è molto breve ed è dello stesso ordine di grandezza rispetto al tempo necessario al loro utilizzo. Fanno parte di questa categoria ad esempio le risorse naturali di energia possedute dall’acqua, dal sole, dal vento e dal mare.

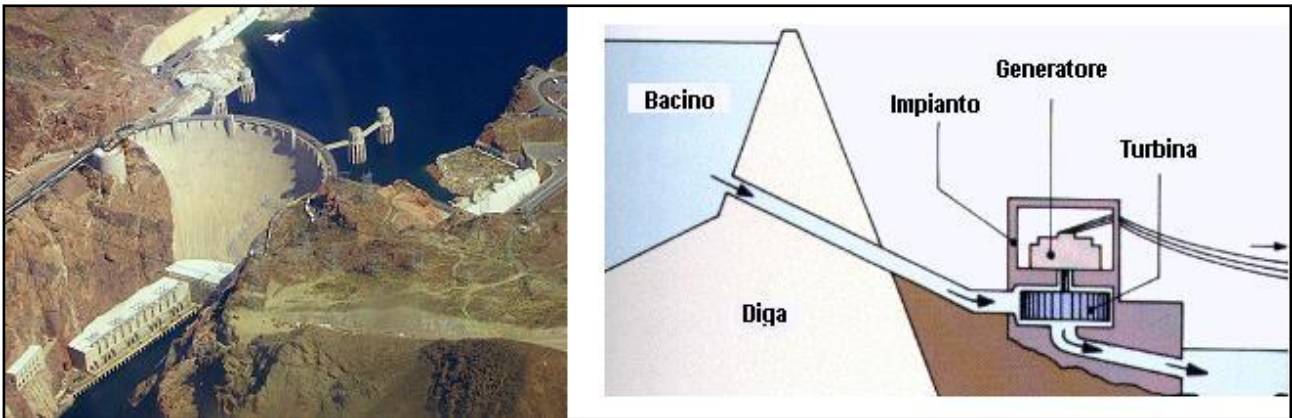
La spinta decisiva che ha portato a studiare delle alternative ai combustibili fossili, nasce a seguito della crisi energetica del 1973 quando i paesi arabi aumentarono improvvisamente il prezzo del greggio causando un incremento globale del costo di tutti i suoi derivati quali carburanti e soprattutto energia elettrica. A seguito di questo avvenimento i paesi più industrializzati hanno capito l’importanza di essere indipendenti dal punto di vista energetico ed hanno iniziato in maniera intensiva la ricerca di tecnologie innovative.

Oggi la maggior parte dell’energia circa l’ 80% proviene da fonti fossili ma è sempre più diffusa la preoccupazione riguardo ad un loro prossimo esaurimento. Le preoccupazioni per il disordine sui mercati dei combustibili fossili e le fluttuazioni dei prezzi, nonché il loro impatto ambientale negativo, inducono a privilegiare politiche energetiche sostenibili che includano lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili. Esistono comunque diversi limiti che ne ostacolano il totale impiego, ad esempio il solare e l’eolico sono fonti cosiddette “intermittenti”, poiché dipendono dalla presenza di sole e vento, inoltre necessitano di siti con specifiche caratteristiche territoriali ed ambientali (aree ventilate e libere da ostacoli per l’eolico e aree soleggiate ed estese per il solare) tali da rendere conveniente la loro installazione senza che il territorio stesso subisca un impatto ambientale dannoso o antiestetico. Tuttavia è bene sottolineare il fatto che qualsiasi di questi impianti non comporta modifiche irreversibili o permanenti ai danni del territorio essendovi la possibilità di uno smantellamento completo.

# ENERGIA IDROELETTRICA

La funzione primaria di una centrale idroelettrica consiste nel trasformare l'energia potenziale posseduta dal fluido in energia cinetica e successivamente, convertire quest'ultima in energia meccanica raccolta da una macchina motrice.

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



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

Si possono suddividere le dighe in due macroscopiche categorie: quelle a gravità e quelle ad arco. Nel primo caso la stabilità e la resistenza alla spinta idrostatica sono affidate esclusivamente al peso della costruzione, nel caso di dighe ad arco invece la spinta idrostatica delle acque d'invaso viene trasferita sulle pareti laterali su cui poggia la diga stessa. Queste ultime hanno forma convessa e possono essere costruite solo per sbarrare valli non molto larghe con fianchi rocciosi.



In entrambi i casi il materiale principale di costruzione è il calcestruzzo.

Condotte forzate intersecate dai dispositivi di regolazione di portata e velocità consentono di ottimizzare, in funzione della potenza richiesta, le caratteristiche del flusso che raggiunge le turbine, le quali possono essere di tipo Pelton, Francis o Kaplan, a seconda del layout dell'impianto.

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

All'albero motore della turbina sarà poi collegato un generatore elettrico che invierà in rete l'energia prodotta.

E' interessante sottolineare una pratica diffusa in questi impianti:

- Durante le ore diurne, momento in cui la richiesta di energia alla rete è maggiore, le turbine fungono da macchine motrici, l'acqua scorre dal bacino verso valle, il rotore viene messo in movimento sottraendo energia cinetica al fluido e il generatore immette energia elettrica in rete;
- Viceversa durante le ore notturne, in cui la richiesta e quindi anche il costo per singolo kWh è minore, il funzionamento è opposto. Modificando l'orientamento delle pale nella girante o utilizzando una macchina motrice, si trasferisce acqua dal bacino di valle verso quello di monte.

Impianti di questo tipo consentono di produrre energia elettrica senza immissione in ambiente di gas inquinanti, come termine comparativo si pensi che una centrale termoelettrica immette in atmosfera 600 g di CO<sub>2</sub> per ogni kWh prodotto.

Per contro però, l'impatto ambientale di una centrale idroelettrica è notevole in quanto i fiumi hanno un ruolo fondamentale nella conservazione dell'ecosistema, garantendo la circolazione di acqua e di nutrienti disciolti in essa. Alterare le condizioni di un corso d'acqua mediante la creazione di un bacino artificiale o di una diga significa trasformare un fiume ben ossigenato in un lago privo di ossigeno che impoverisce l'ecosistema mettendo a rischio molte delle specie viventi.

Maggiore è l'interruzione del flusso naturale delle acque e maggiore sarà l'impatto sull'ecosistema e la riduzione di qualità delle acque.

Tuttavia gli impatti ambientali diretti, come la deviazione di una massa d'acqua, le trivellazioni, l'alterazione di pendenza sono solitamente minori rispetto agli impatti di tipo indiretto, come la costruzione di abitazioni per gli operai e le loro famiglie, i problemi di salute pubblica per queste persone, la massiccia deforestazione e l'introduzione di una nuova, seppure temporanea, rete di trasporti.

Vediamo ora come è possibile calcolare empiricamente quale può essere l'energia messa a disposizione da una centrale idroelettrica.

$$\text{Potenza ottenibile} \rightarrow P = \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot h_g$$

$$\text{Densità di potenza} \rightarrow D_p = \frac{P}{Q} = \rho \cdot g \cdot h_g \cdot \eta$$

In cui:

- $\rho$  → Rappresenta la densità dell'acqua (1000 kg/m<sup>3</sup>);
- $Q$  → La portata (m<sup>3</sup>/s);
- $g$  → L'accelerazione gravitazionale (9,81 m<sup>2</sup>/s);
- $h_g$  → Il salto geodetico (m);
- $\eta$  → Il rendimento globale (85-90%).

L'energia idroelettrica è l'unica tra le fonti rinnovabili ad essere utilizzata su larga scala grazie soprattutto a tecnologie ormai fortemente affermate che consentono di ovviare al 16% del fabbisogno elettrico mondiale.

In Italia questa fonte è la risorsa energetica interna più importante. Essa fornisce circa il 15% del fabbisogno elettrico nazionale e costituisce il 75% dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili. Le maggiori centrali idroelettriche sono in settentrione ed in particolare in Lombardia, Piemonte e Trentino.

# ENERGIA SOLARE

Il sole rappresenta la fonte di energia rinnovabile maggiormente disponibile sulla Terra poiché teoricamente qualsiasi zona del pianeta è raggiunta dalle sue radiazioni. Il suo sfruttamento tuttavia presenta problemi tecnici ed economici che difficilmente potranno essere superati, quali ad esempio la bassa densità di potenza delle radiazioni solari, la loro discontinuità e soprattutto i bassi rendimenti di conversione.

Per questi motivi l'energia solare viene raramente impiegata su grande scala, mentre sono ormai molto diffusi piccoli impianti eliotermici o fotovoltaici adibiti ad uso domestico.

Come la maggior parte delle fonti di energia rinnovabile, anche quella solare presenta molteplici aspetti positivi, tra i quali:

- La totale assenza di emissioni inquinanti;
- Il risparmio dei combustibili fossili;
- Grande affidabilità dovuta all'assenza di parti in movimento;
- Costi di manutenzione ridotti al minimo;
- Modularità, per aumentare la taglia dell'impianto basta aumentare il numero dei moduli.

I pannelli fotovoltaici convertono le radiazioni solari direttamente in corrente continua, che sarà poi trasformata da un inverter in corrente alternata.

La conversione avviene sfruttando l'effetto fotoelettrico degli elementi che compongono il pannello e quindi senza la necessità di avere parti in moto o alcun tipo di combustione. Nella maggior parte dei casi si tratta di celle in silicio interfacciate tra loro fino a formare unità di circa mezzo metro quadrato di superficie, che vengono a loro volta collegate fino a creare pannelli dalle dimensioni maggiori.

Per dare un'idea della produzione elettrica che può essere garantita da questi sistemi, occorre considerare che l'energia solare presenta una densità di potenza di  $1,4 \text{ kW/m}^2$  nelle condizioni ideali: fuori dall'atmosfera e coi raggi solari perpendicolari alla terra. Oltre alla latitudine incide anche la possibilità di avere giorni nuvolosi, quindi tale valore deve essere ridotto attraverso indici calcolati in base a dati statistici.

Detto questo, se consideriamo di essere all'equatore e ipotizziamo che in un anno vi sia il 50% di giorni nuvolosi con una media di 6 ore solari al giorno, l'energia fornita del pannello risulta di 3,74 kWh/m<sup>2</sup>day. Introducendo infine l'efficienza di conversione elettrica, che mediamente non supera il 12%, tale valore scende a 0,45 kWh/m<sup>2</sup>day.

Cielo nuvoloso	0.28
Cielo sereno	0.61

*Coefficienti caratteristici per impianti fotovoltaici*

$$Energia = 1,4 \cdot 6 \cdot (0,5 \cdot 0,28 + 0,5 \cdot 0,61) = 3,74 \frac{kWh}{m^2 day}$$

$$Energia \text{ elettrica} = 3,74 \cdot 0,12 \approx 0,45 \frac{kWhe}{m^2 day}$$

E' chiaro che per poter ottenere un quantitativo modesto di energia elettrica occorrono pannelli di notevoli dimensioni e radiazioni solari dall'elevato contenuto energetico, che sono tra l'altro i punti deboli di questa tecnologia. L'installazione di pannelli di grandi dimensioni implica infatti una maggiore probabilità di malfunzionamento di alcune celle ed il rischio che parte di esse subiscano ombreggiamenti nel corso della giornata, fenomeni che comportano il crollo del rendimento dell'intero sistema. I raggi del sole inoltre presentano la massima potenza nelle ore centrali della giornata (11-15). L'aspetto che rende questa tecnologia economicamente conveniente, nonostante tuttora presenti costi specifici elevati (2500-3000 €/kW), è dato dal fatto che la vita di un impianto fotovoltaico può superare facilmente i 20 anni senza richiedere particolari interventi manutentivi, se non periodiche pulizie superficiali per mantenere alto il rendimento di conversione. Risulta quindi particolarmente indicato per ovviare al fabbisogno di utenze isolate, quali condomini o palazzi pubblici, che potranno disporre di energia gratuita dopo un primo periodo di tempo in cui si recupera il capitale investito.



*Tegole di un moderno tetto fotovoltaico*

Per favorire la diffusione dei pannelli fotovoltaici ad uso domestico tutti i nuovi edifici devono obbligatoriamente essere predisposti all'installazione di questi apparati. Si inizia a diffondere quindi il concetto già ampiamente sviluppato in parecchi paesi europei del cosiddetto "tetto fotovoltaico".

## **ENERGIA GEOTERMICA**

E' l'energia derivante dal calore presente nelle profondità della Terra si manifesta sottoforma di geysir, eruzioni vulcaniche, fumarole o sorgenti calde.

Le zone caratterizzate da fenomeni di questo tipo sono chiamate siti idrotermali e presentano un gradiente di temperatura geotermico che può raggiungere i 2530 °C/100m, superiore di circa 10 volte rispetto alla media terrestre. In queste zone quindi si possono sfruttare salti di temperatura abbastanza elevati senza doversi spingere troppo in profondità. Per questo motivo i sistemi per lo sfruttamento dell'energia geotermica vengono progettati in prossimità di siti idrotermali.

Essi si suddividono in due categorie:

- Ad acqua dominante, se è la quantità d'acqua a prevalere rispetto a quella del vapore in uscita dalla superficie;
- A vapore dominante, se è la quantità di vapore a prevalere rispetto a quella dell'acqua in uscita dalla superficie;

In entrambi i casi comunque sono sempre presenti in quantità variabili alcuni gas, come anidride carbonica, solfuro di idrogeno e altri incondensabili.

I siti a vapore dominante sono meno diffusi rispetto agli altri e tra i più conosciuti c'è quello di Larderello in Toscana e The Geysers in California.

L'energia geotermica viene sfruttata soprattutto per produrre elettricità, ma in alcuni casi risulta economicamente conveniente sfruttarne direttamente l'energia termica per alimentare i sistemi di riscaldamento ambientale oppure per fornire acqua calda ad utenze civili o industriali che si trovano nelle vicinanze del sito idrotermale. Gli impianti adibiti alla produzione elettrica possono essere di vario tipo e in genere utilizzano vapore o acqua ad una temperatura di almeno 150°C.

## **ENERGIA DAL MARE**

Gli oceani si estendono per gran parte della superficie terrestre e rappresentano una grandissima fonte di energia termica, potenziale e cinetica.

Nonostante questo, la ricerca non ha ancora maturato una tecnologia affermata a tal punto da rendere economicamente conveniente il suo sfruttamento. Di conseguenza questa fonte di energia è ancora considerata sperimentale e attualmente può contare solo su pochi prototipi in funzione. L'energia che il mare può offrire è quella contenuta nelle maree, nel moto ondoso, nelle correnti e nel suo gradiente termico.

- **MAREE**

Per poter sfruttare l'energia messa a disposizione dal naturale ciclo delle maree è necessario disporre di un bacino, naturale o artificiale, comunicante col mare aperto, ma dotato di una paratoia in grado di isolarlo da esso in particolari momenti della giornata. L'idea alla base di questa tecnologia è molto semplice. In pratica quando il livello del mare inizia a crescere la paratoia viene aperta e contemporaneamente viene azionata una pompa per favorire l'ingresso dell'acqua nel bacino, che si alzerà più lentamente rispetto a quello del mare.

Quando entrambi i livelli si pareggiano, viene chiusa la paratoia e viene spenta la pompa. In questa condizione all'interno del bacino l'acqua ha raggiunto il suo livello massimo.

Successivamente il livello del mare tornerà a calare e quando si raggiunge il salto utile si aprirà la turbina, che permetterà all'acqua del bacino di tornare in mare. E' in questa fase che avviene la produzione di elettricità. Si stima che soltanto attraverso le maree si potrebbe ovviare al 15% del fabbisogno annuo di energia elettrica. Una percentuale decisamente irraggiungibile se si considerano gli elevati costi impiantistici e l'enorme impatto ambientale a scapito della zona costiera.

- **MOTO ONDOSO**

L'energia cinetica delle onde può essere sfruttata mediante sistemi offshore e sottocosta.

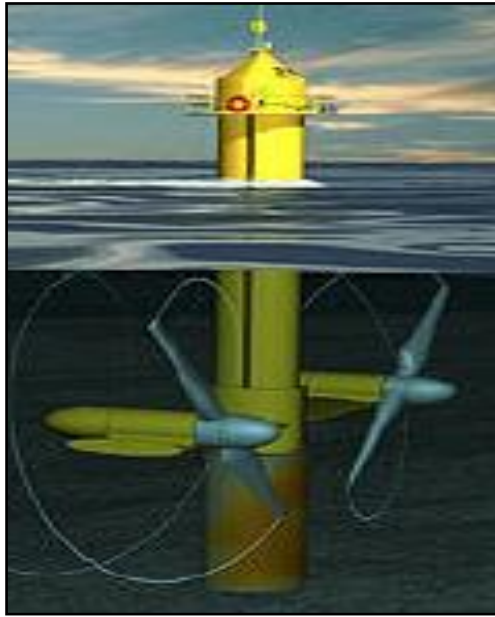
Nel primo caso un galleggiante viene ancorato rigidamente ad un compressore posto sul fondo del mare.

Il moto ondoso muove alternativamente su e giù il galleggiante che aziona il compressore, che a sua volta mette in movimento una turbina ad esso adiacente. I sistemi sottocosta necessitano invece di una struttura in cemento armato, con dei fori che permettono l'entrata dell'acqua al suo interno ed una valvola di non ritorno per fare entrare ed uscire l'aria. Quando l'onda si ritrae, l'acqua in uscita dalla struttura aspira l'aria dall'esterno. In un secondo momento, al ritorno dell'onda, la valvola si chiude e l'aria rimasta intrappolata all'interno della struttura è costretta ad attraversare una turbina eolica che alimenta un generatore elettrico.

Anche impianti di questo tipo comportano un notevole impatto ambientale negativo a scapito del territorio, in particolare della zona costiera il cui ecosistema è peraltro molto delicato.

- **CORRENTI MARINE**

L'energia cinetica trasportata dalle correnti è, molto probabilmente, la forma di energia marina più interessante. Lo sfruttamento di questa risorsa avviene in maniera del tutto analoga a quanto accade per i generatori eolici.



*Rappresentazione virtuale di una turbina marina ad asse verticale installata al largo della  
Norvegia*

In questo caso ovviamente la turbina è posta nelle profondità marine, in quelle zone costantemente soggette a forti correnti. Come per le macchine eoliche anch'esse possono essere ad asse orizzontale o verticale. Le prime si adattano alle correnti marine costanti, come ad esempio quelle presenti nel mar Mediterraneo, mentre le altre sono maggiormente compatibili con correnti la cui direzione varia nel corso dell'anno.

## **ENERGIA DA BIOMASSE**

Biomassa è l'abbreviazione di "massa biologica". Questo termine indica qualsiasi sostanza organica di origine animale o vegetale che non sia fossile.

Vengono considerate biomasse tutti quei residui ecocompatibili che derivano dal settore agricolo, da quello civile e da quello industriale, che possono essere direttamente combusti per ottenere energia termica, oppure dai quali è possibile ricavare combustibili ecologici. La biomassa è una fonte di energia molto abbondante in natura, inesauribile se gestita in maniera accurata, predisponendo ad esempio piani di rimboschimento o aree adibite a colture mirate. In alcune zone si sta cercando di favorire questa fonte di energia con aree adibite alla produzione di biomasse legnose o erbacee, come il pioppo, la robinia, il sorgo da fibra, la canna comune e il miscanto.



Tuttavia nel biennio 2011/2012 nonostante la tecnologia necessaria a sfruttare questa fonte sia ancora molto costosa sono state realizzate un numero elevato di centrali a biomasse.

Le principali applicazioni della biomassa sono:

- La produzione di energia (*Biopower*)
- La sintesi di carburanti (*Biofuel*)

## **ENERGIA EOLICA**

### COME SFRUTTARE L' ENERGIA DEL VENTO

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

Quando diverse masse d'aria vengono a contatto, la zona dove la pressione è maggiore tende a trasferire aria in quelle dove la pressione è minore dando luogo a un piccolo flusso.

Il vento è dunque lo spostamento d'aria tra zone di diversa pressione e tanto più alta è questa differenza, tanto più veloce sarà lo spostamento e quindi più forte sarà il vento.

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

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

Riguardo lo sfruttamento dell'energia eolica come elemento fondamentale di un macchinario rotante, le prime fonti parlano di un mulino persiano risalente addirittura 644 a.C. ma si suppone che Cinesi ed Egiziani abbiano utilizzato molto prima il vento, per la macinatura e il pompaggio (sembra verso il 3600 a.C.).

Si trattava di rotori ad asse verticale forniti di velature, che verso la fine dell'anno 1000 hanno avuto un grosso sviluppo. I primi mulini a vento europei invece trasportavano acqua o muovevano le macine per tritare i cereali, in particolare in Olanda erano utilizzati per pompare l'acqua dei polder (che sono delle parti di terra sotto il livello del mare), migliorando notevolmente il drenaggio dopo la costruzione delle dighe.



I mulini olandesi erano i più grandi del tempo, divennero e rimasero il simbolo della nazione. Questi mulini erano formati da telai in legno sui quali era fissata la tela che formava così delle vele spinte in rotazione dal vento.

Nel corso del XIX secolo entrarono in funzione migliaia di mulini a vento anche nel resto d'Europa, e poi in America, soprattutto per scopi di irrigazione. In seguito, con l'invenzione delle macchine a vapore, vennero abbandonati per il costo del carbone, allora a buon mercato.

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

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

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

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

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

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

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

Le prime turbine realizzate sia orizzontali sia verticali utilizzano un generatore asincrono che presenta la costanza della frequenza, parametro indispensabile per l'immissione di elettricità nella rete elettrica, indipendentemente dalla velocità di rotazione delle pale (purché essa sia superiore a quella di sincronismo); questa sembrerebbe la scelta più naturale per un impiego del genere, vista la non costanza della velocità di rotazione. Lo svantaggio risiede nella necessità di adoperare un moltiplicatore di giri, fonte di molto rumore che introduce perdite meccaniche e possibilità di rotture ma conferisce al tempo stesso il vantaggio di non utilizzare un generatore enorme, per le troppe coppie polari, ed evita alle pale di dover ruotare troppo velocemente.

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

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

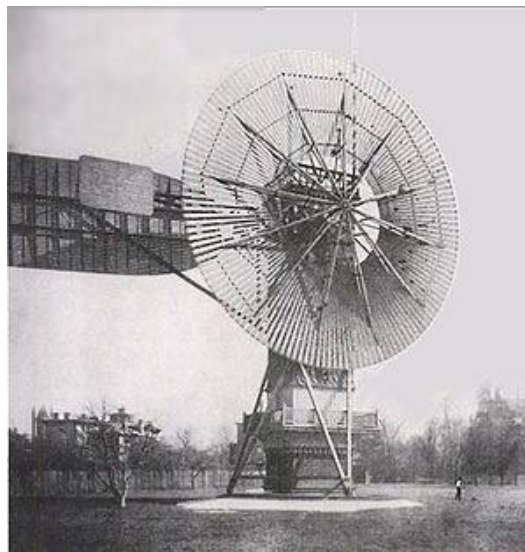


# ANALISI DELLE TIPOLOGIE DI TURBINE

## TURBINE AD ASSE ORIZZONTALE

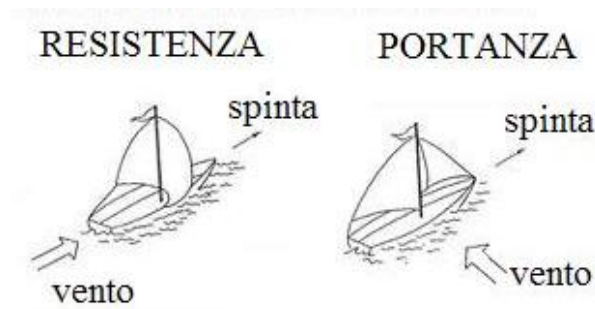
Uno dei primi tentativi di generare elettricità sfruttando il vento fu fatto negli Stati Uniti nel 1888 da Charles Brush.

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



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

Proprio come accade in campo nautico dove prevalgono le zone in cui la navigazione avviene per portanza e non per resistenza, anche nel settore eolico dal punto di vista prestazionale è vantaggioso prediligere la forza di portanza dato che nella maggior parte delle configurazioni in cui una pala si trova a lavorare tale forza risulta superiore alla resistenza.



Il tutto comporta un rotore con una grande velocità angolare e una coppia più piccola, quindi un meccanismo che tutto sommato riesce a produrre maggior potenza, ben si adatta per la produzione di energia ma non per applicazioni di pompaggio dell'acqua o macinazione del grano, inoltre la bassa coppia genererà una scia a valle del rotore di minor estensione.

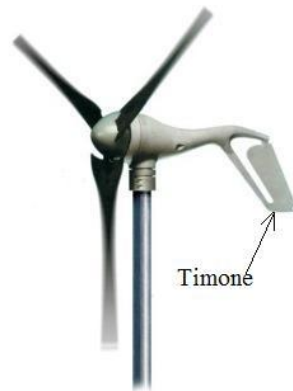
Le moderne turbine eoliche ad asse orizzontali basate su portanza si rifanno al modello introdotto da Marcellus Jacobs la cui macchina prevedeva tre pale, una serie di batterie di accumulazione e un timone direzionale che orientava il rotore al vento. Durante tutto il ventesimo secolo questo tipo di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

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

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

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

Nel caso di macchine di piccola potenza la variazione dell'angolo di "pitch" è assente, mentre quella dell'angolo di "yaw" al posto di essere effettuata da servomeccanismi viene garantita da un timone che ricorda nelle forme una pinna di pesce e meccanicamente, senza elettricità orienta la navicella.



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

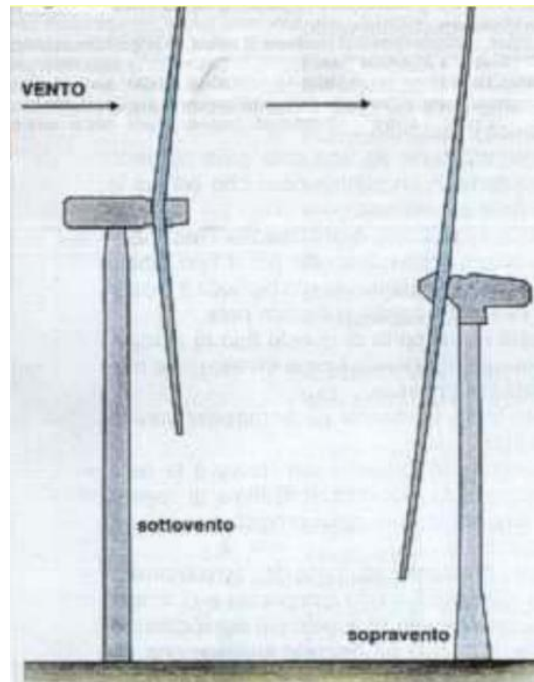
Può essere costituita da un traliccio simile a quelli utilizzati per il sostegno dei cavi elettrici ma questa soluzione ha lo svantaggio di essere strutturalmente molto rigida e di trasmettere alle fondazioni tutti i carichi generati dalla navicella, particolarmente elevati in certe condizioni transitorie.

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



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

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



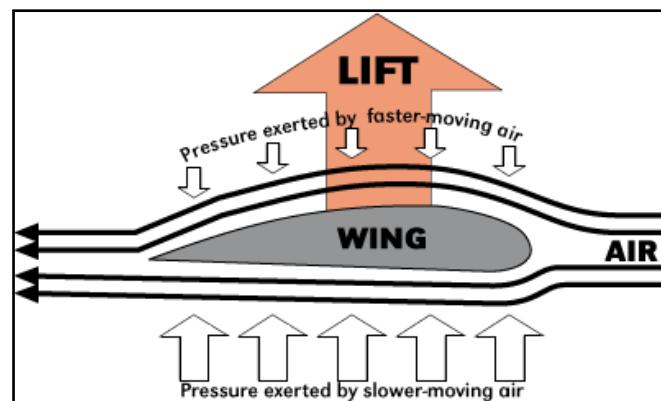
Presenta però il grosso svantaggio di generare carichi pulsanti su tutta la struttura facendo sorgere il fenomeno della fatica e poi c'è anche il problema della schermatura generata dalla torre che riduce l'efficienza,

ragione per cui in genere si predilige l'installazione sopravvento che pur richiedendo pale più rigide al fine di evitare che una loro flessione le porti a impattare contro la torre di sostegno garantisce maggior efficienza.

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

# PORTANZA

Un modo di trasformare l'energia del vento in energia meccanica è sfruttare il principio aerodinamico della portanza. Un flusso d'aria che incontra un ostacolo di forma opportuna si suddivide in due flussi asimmetrici e poi si ricongiunge a valle dell'ostacolo generando una forza normale alla sua direzione. Prendendo ad esempio una forma simile alla sezione dell'ala di un aereo, come abbiamo visto in precedenza, il flusso d'aria che passa sopra l'ala deve accelerare il suo moto per oltrepassare l'ostacolo nello stesso tempo del flusso sotto l'ala. Questa accelerazione crea, per il principio di Bernoulli, una caduta di pressione rispetto alla parte sotto l'ala. Questa differenza di pressione è la responsabile della forza di sostentamento detta portanza.



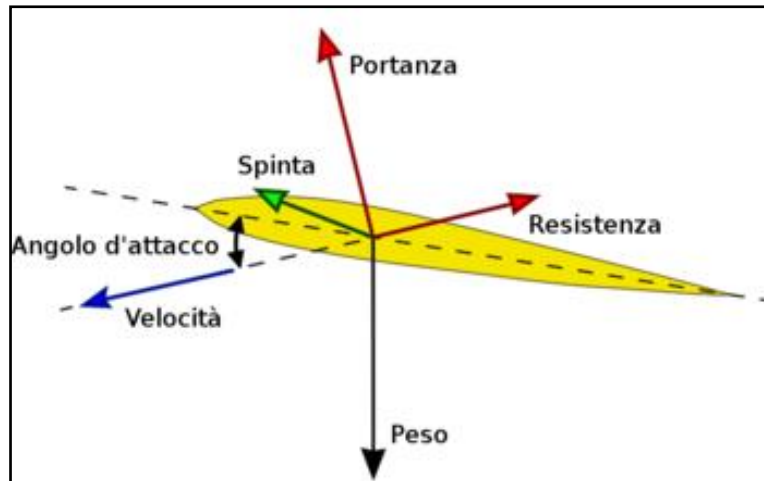
La forma che assume il flusso d'aria attorno all'ala ha un ruolo fondamentale nella portanza. Se infatti si inclina l'ala aumentando l'angolo  $\alpha$  fino ad un certo livello, la portanza aumenta. Se si supera questo livello vi è un distacco del flusso nella parte finale dell'ala, con innesco di vortici e conseguentemente riduzione della portanza. Oltre un certo angolo la portanza sparisce del tutto e l'ala è completamente in stallo.

Secondo Bernoulli la portanza è proporzionale alla forza del vento secondo:

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot v_v^2$$

In cui:

- $c$  è la corda del profilo;
- $\rho$  la densità dell'aria

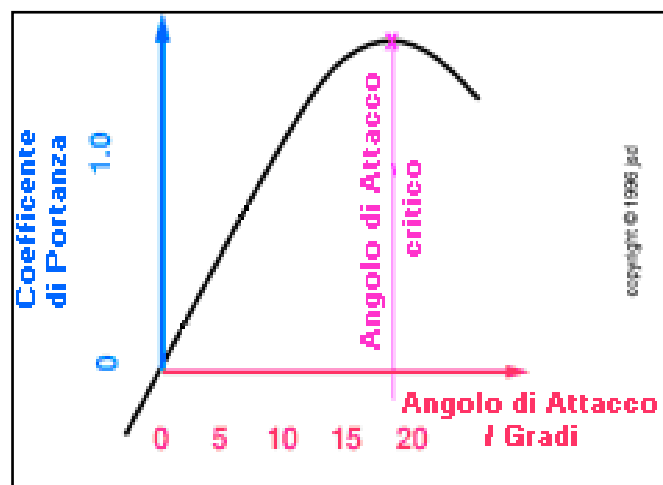


*Direzione della portanza in funzione dell'angolo di incidenza*

Il parametro  $C_L$  (coefficiente di lift = coefficiente di portanza), dipende dalla forma dell'ala e dall'inclinazione dell'ala rispetto alla direzione del vento. Le possibili forme, sono state studiate e normate da varie organizzazioni e si trovano in letteratura.

Applicando questo modello allo schema di un rotore possiamo calcolare il momento dato dal vento al rotore.

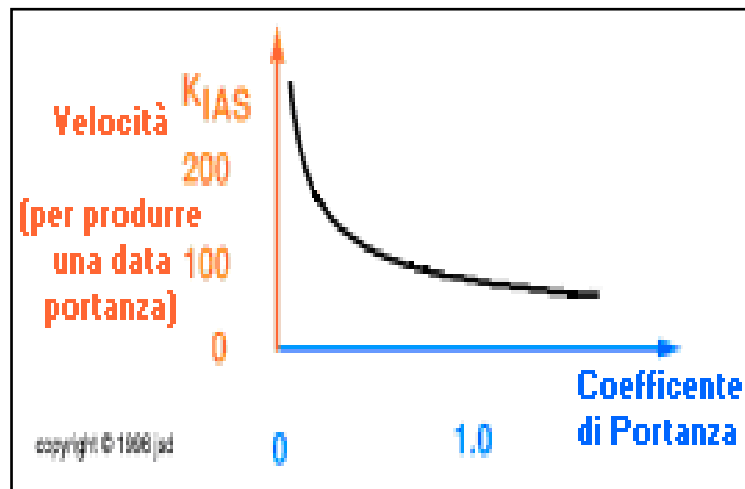
La figura mostra la dipendenza del coefficiente di portanza dall'angolo d'incidenza.



Si nota che per piccoli angoli, il coefficiente di portanza è sostanzialmente proporzionale all'angolo d'incidenza. L'angolo d'incidenza che dà il massimo coefficiente di portanza è chiamato "angolo d'incidenza critico".

Nell'ipotesi in cui la portanza sia già nota, dall'equazione appare evidente che se ad esempio la velocità dell'aria diminuisce, il coefficiente di portanza deve aumentare (assumendo ovviamente che l'aria dell'ala non cambi).

Questa relazione è illustrata in figura



Sono gli aerogeneratori ad asse orizzontale a sfruttare la portanza per creare energia dal vento.

# TIPOLOGIE DI ROTORI

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

- Rotori tripala: con tre pale montate a  $120^\circ$  l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico tra 30 e 60 giri/minuto, è la configurazione più usata perché, se pur a fronte di costi di trasporto e di costruzione maggiori, è quello con il miglior rapporto costo/potenza sviluppata;



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



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

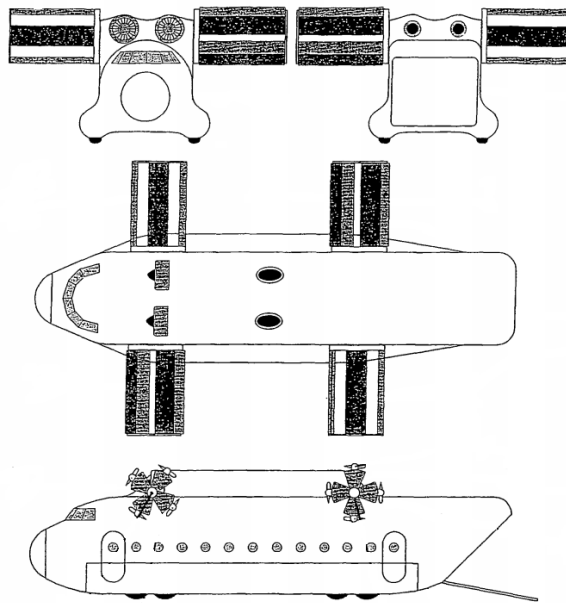


## TURBINE AD ASSE VERTICALE

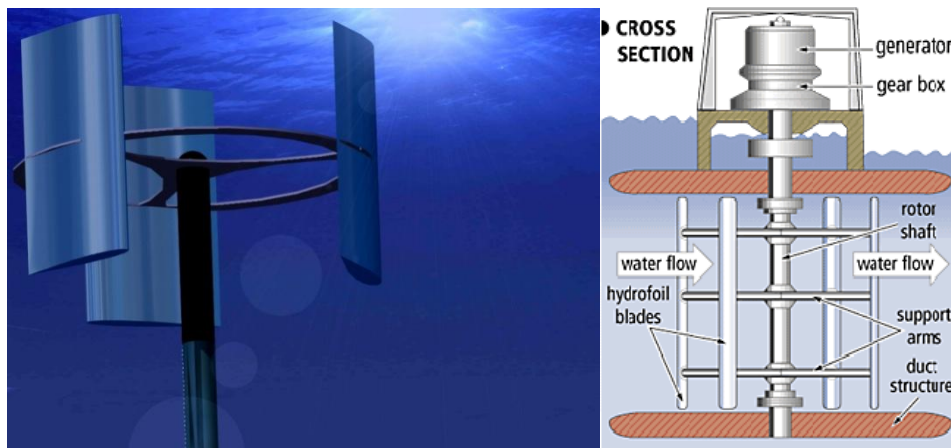
L'idea di utilizzare delle pale disposte parallelamente all'asse di rotazione che nel loro movimento delimitano una superficie cilindrica, al posto della classica disposizione radiale che descrive un cerchio, non è una peculiarità dell'eolico, ma esistono diverse applicazioni che sfruttano tale concetto;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



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



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



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

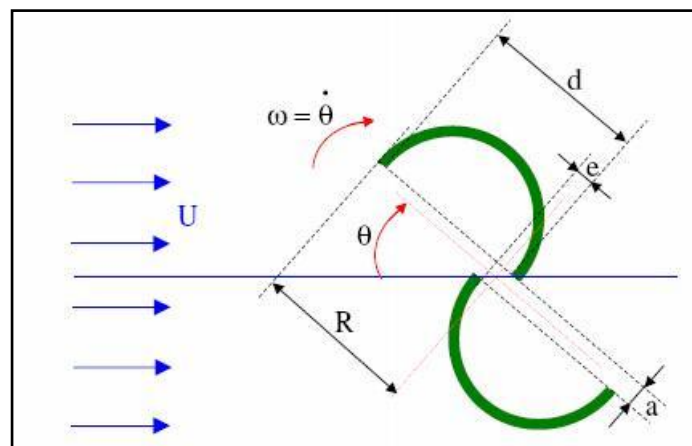


# TURBINA SAVONIUS

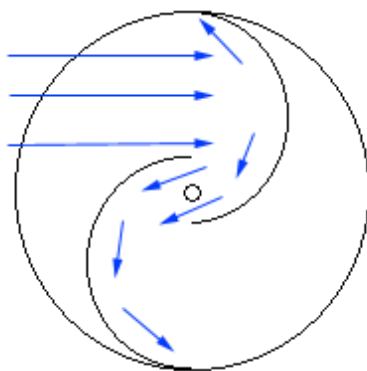
Sono turbine a che funzionano unicamente a resistenza, vennero inventate da un ingegnere finlandese Sigurd Savonius da cui ne deriva il nome. La loro realizzazione è molto semplice e prevede due semicilindri fissati a un albero centrale e montati in opposizione.



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



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

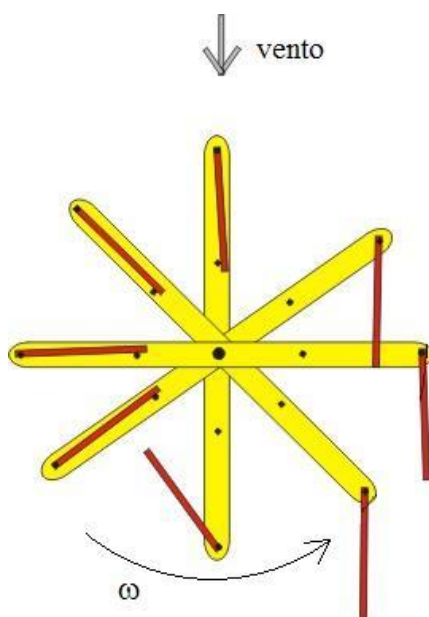


## IL PANEMONE

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

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

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



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

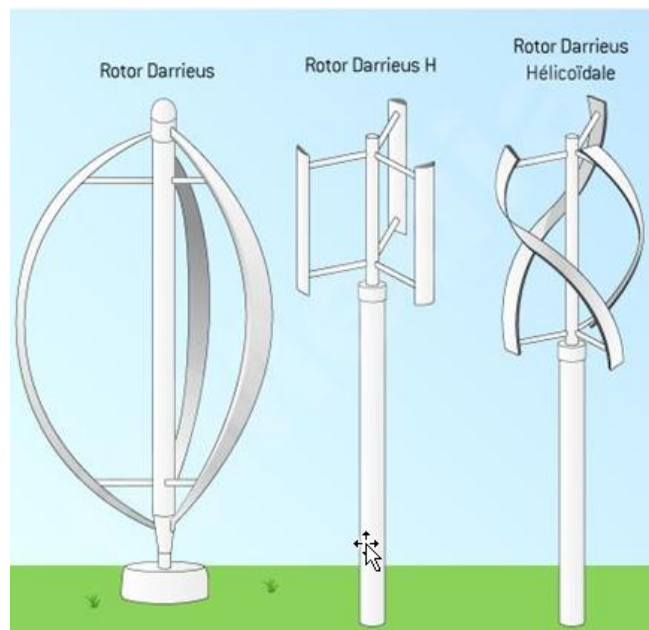
L'uso del panemone potrebbe sembrare redditizio rispetto ad una Savonius, essendo minima la resistenza aerodinamica delle parti che si muovono controvento, ma va detto che, mentre un panemone utilizza come superficie resistente utile a generare coppia motrice un pannello piatto, la Savonius utilizzando una forma semicircolare ottimizza tale coppia.

Quindi se da un lato la Savonius ha l'inconveniente di ridurre la potenza prodotta a causa dei movimenti controvento dall'altro il semicilindro è più efficiente nello sfruttare la vena fluida rispetto a un pannello, quindi le due macchine si equivalgono in termini di prestazioni.

## TURBINA DARRIEUS

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

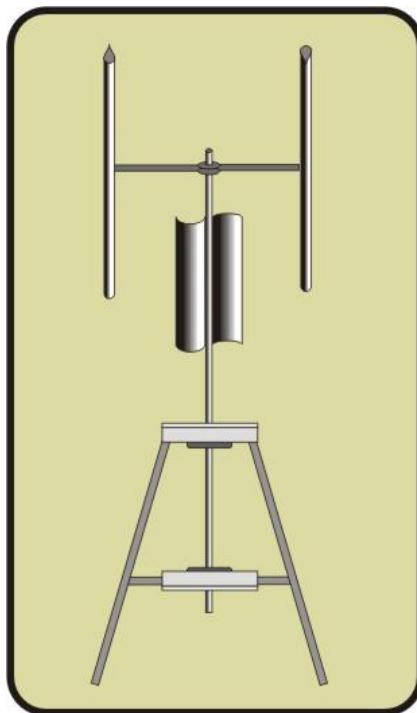
Il nome Darrieus si riferisce a tre classi di turbine ad asse verticale: le “eggbeater”, “H-type”, e la Darrieus elicoidale che si differenziano tra di loro solo per la forma delle pale, ma tutte funzionano sfruttando la portanza creata dal profilo palare.



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

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

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



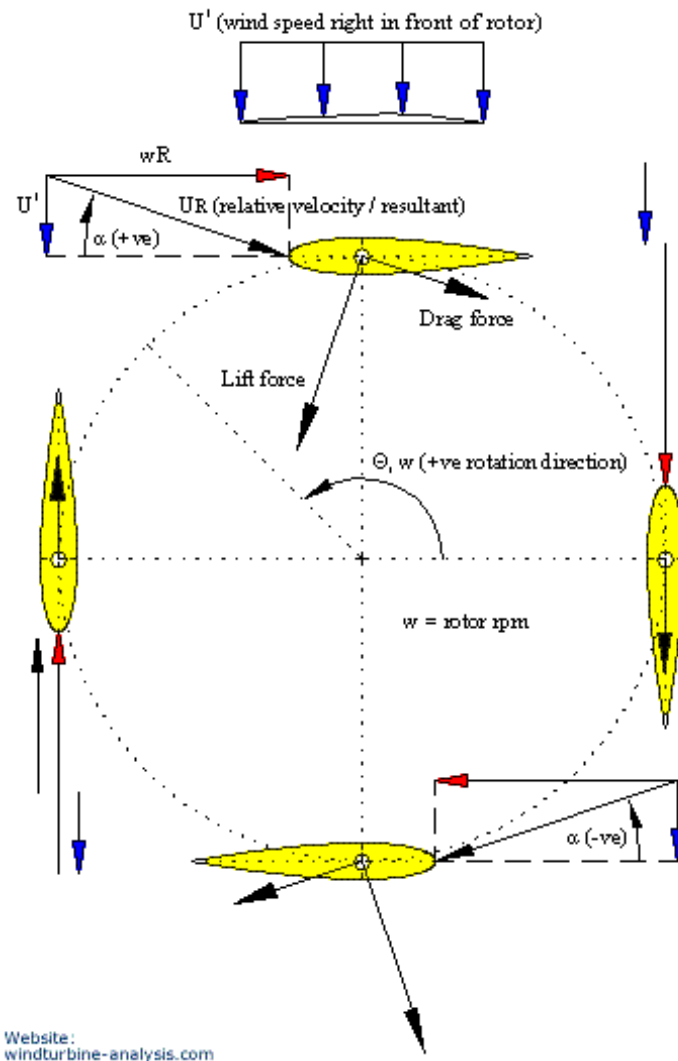
Un altro sistema per l'avviamento consiste nell'utilizzare elettricità per portarsi nella condizione di auto sufficienza; sebbene questo metodo è funzionante, non sempre è desiderabile, in quanto la turbina deve essere collegata ad una centrale elettrica e nel caso in cui essa venga usata per il pompaggio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

Le forze trainanti delle turbine Darrieus possono essere descritte in dettaglio con l'aiuto della figura sottostante. Ci sono due componenti di velocità importanti: la velocità del profilo alare rispetto all'albero, che è sempre parallela alla corda, di modulo pari alla velocità angolare moltiplicata per il raggio e la velocità del vento, approssimata con una velocità costante in direzione, modulo e verso.

La risultante di questi due vettori è la velocità dell'aria rispetto al profilo alare, cioè la velocità apparente del vento, detta anche velocità relativa. L'angolo tra questa risultante e la corda del profilo alare si chiama l'angolo di attacco  $\alpha$ .

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

Sempre osservando la figura, in cui sono rappresentate quattro pale con un profilo alare simmetrico, nella posizione  $\theta=0^\circ$  e in quella  $\theta=180^\circ$  si ha  $\alpha=0^\circ$  ed esiste solo una forza di resistenza; per poter generare una spinta di portanza è necessario un angolo di attacco diverso da zero, altrimenti a causa della simmetria tra dorso e ventre della pala non si genera nessuna differenza di pressione e quindi nessuna forza motrice positiva (mentre se il profilo è asimmetrico l'angolo di attacco per il quale si ha portanza nulla varia da profilo a profilo, cosicché anche con un angolo di attacco nullo si potrebbe ottenere generazione di portanza). Non appena le pale si allontanano dall'angolo appena descritto nasce la portanza, dall'inglese "lift force", cioè una forza perpendicolare alla velocità relativa che possiede una componente in grado di spingere in avanti le pale; naturalmente la forza di resistenza, dall'inglese "drag force", diretta come la velocità relativa rimane e tende a rallentare le pale. La coppia generata dalle forze di portanza deve essere maggiore della coppia generata da quelle di resistenza per poter essere in grado di produrre energia utile.



## LEGENDA

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

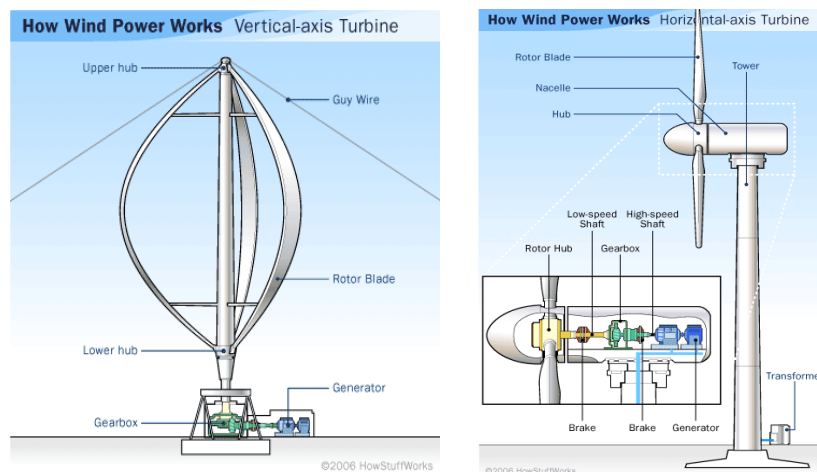
Le pale delle Darrieus, al pari di quelle delle turbine ad asse orizzontale, quando raggiungono una velocità eccessiva iniziano a stallare, offrendo un freno aerodinamico per il rotore, evitando i sovraccarichi, inoltre spesso questi aerogeneratori sono dotati di un ulteriore meccanismo mobile che alle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

# ORIZZONTALE E VERTICALE A CONFRONTO

Le turbine ad asse orizzontale rappresentano attualmente le turbine di più comune utilizzo anche grazie ai loro costi di mercato più favorevoli; infatti hanno soppiantato le turbine ad asse verticale anche se l'evoluzione di queste ultime ha portato segnali di senso opposto.

Rispetto all'eolico ad asse orizzontale le turbine ad asse verticale hanno diversi vantaggi uno dei quali è il fatto di presentare il generatore in basso, vicino al terreno facilitando le operazioni di manutenzione; altro punto a favore dell'asse verticale è una bassa produzione di rumore, infatti le pale si mantengono sempre alla stessa distanza dall'albero principale evitando che si formi quel cono di rumore tipico delle turbine ad asse orizzontale quando la pala passa vicino alla torre di sostegno.

Altri vantaggi sono una maggior semplicità produttiva delle pale e minori costi iniziali poiché manca un sistema di orientamento della macchina, infatti le turbine verticali accettano il vento da qualsiasi direzione, al contrario delle turbine ad asse orizzontale che devono essere disposte a favor di vento.



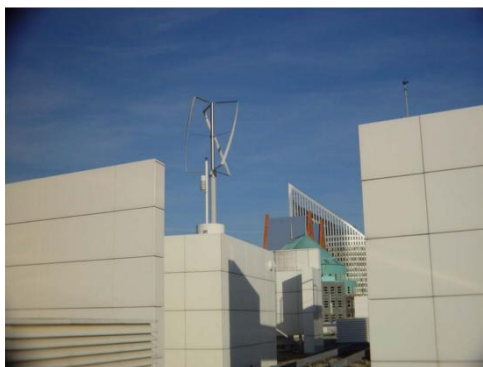
Infine si fa osservare come le macchine ad asse verticale, in genere, avendo altezze inferiori a pari potenza sviluppata, hanno una minor probabilità di essere colpite da un fulmine e la loro messa in sicurezza (tramite l'installazione di cavi conduttori, sia sulla superficie della pala sia al suo interno e lungo l'intera macchina fino ad un'opportuna messa a terra) risulta facilitata.



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

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

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



# FATTORI POSITIVI NELL' UTILIZZO DELLE TURBINE

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

Le dimensioni dei parchi eolici sono tali per cui erogano potenze particolarmente elevate adatti a soddisfare la domanda di grandi città o province popolate.

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

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

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

# FATTORI NEGATIVI NELL' UTILIZZO DELLE TURBINE

Per motivi efficienza ma anche di sicurezza, i generatori eolici possono operare solo in particolari condizioni di vento, l'energia eolica viene prodotta a intermittenza e perciò non è programmabile. Tale situazione fa sì che il settore eolico non possa sostituire completamente fonti tradizionali quali i combustibili fossili o l'energia idroelettrica, per i quali la potenza erogata è costante o direttamente controllabile in base alle esigenze. Tale fonte di energia trova quindi il suo ambito applicativo principalmente nell'integrazione alle reti esistenti affiancata a impianti programmabili per soddisfare la necessità di potenza di picco ad ogni istante durante il giorno. Il problema dell'intermittenza o variabilità aleatoria di tale fonte energetica nelle esigenze energetiche a livello locale può essere superato in linea teorica con una produzione ampiamente distribuita e sovradimensionata e con l'appoggio a sistemi di distribuzione elettrica automatizzati e a larga scala (le cosiddette smart grid) cioè sistemi di distribuzione in grado di smaltire i flussi di energia intermittenti che altrimenti genererebbero sovraccarichi e improvvisi cali di tensioni con ripercussioni sulla produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia stessa. Sulla terraferma, i luoghi più ventosi e quindi più adatti alle installazioni eoliche sono generalmente le cime, i crinali di colline e montagne o le coste. Gli impianti moderni, sebbene siano anche esteticamente apprezzabili, per le loro grandi dimensioni risultano visibili da grande distanza e possono causare un turbamento del paesaggio. Esiste il rischio di mortalità da impatto per gli uccelli migratori, in particolare per gli impianti più grandi. È stato comunque rilevato una mortalità molto inferiore a quella normalmente causata dalle finestre degli edifici e dalle automobili. Il rumore di una turbina eolica è dovuto essenzialmente al vento incidente sulle pale, secondo alcuni studi favorirebbe, nei residenti di abitazioni nelle immediate vicinanze, la cosiddetta "sindrome da pala eolica", un insieme di disturbi a sfondo neurologico in più le autorità preposte al controllo del traffico aereo di alcuni paesi sostengono che gli impianti possono interferire con l'attività dei radar.

# I COSTI DI INSTALLAZIONE

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

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

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



# MODELLO MATEMATICO

## CENNI DI FLUIDODINAMICA

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

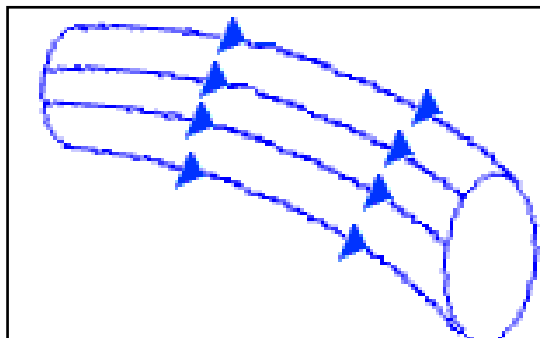
Questo vuol dire che sarà focalizzata l'attenzione su ciò che avviene in un particolare punto nello spazio ad un certo istante, piuttosto che considerare quello che accade nello specifico ad una particolare particella di fluido.

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

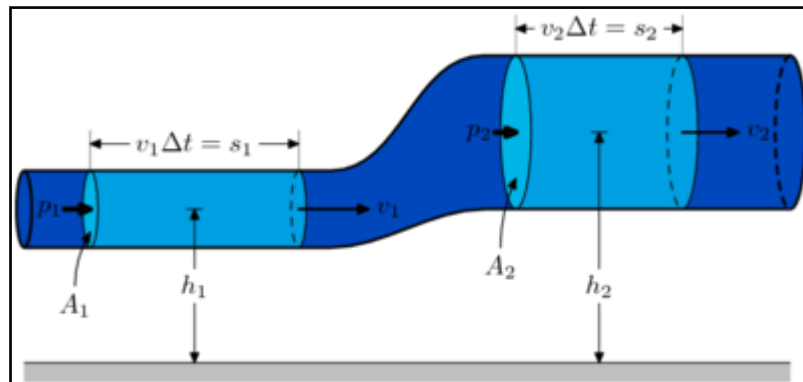
Seguendo il metodo di Eulero, si fissi l'attenzione su un determinato punto della massa fluida  $P(x,y,z)$  e si consideri la velocità  $v(x,y,z,t)$  di un elemento di fluido che passa nel punto  $P$  all'istante di tempo  $t$ . In generale tale grandezza è variabile nel tempo, vale a dire che i vari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

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 dimostra 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.



## PRINCIPIO DI CONTINUITA'

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

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

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

# 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.

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.

Nel caso di tubo di flusso posto orizzontale, indicando con  $p$  la pressione e con  $\rho$  la densità, la somma:

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

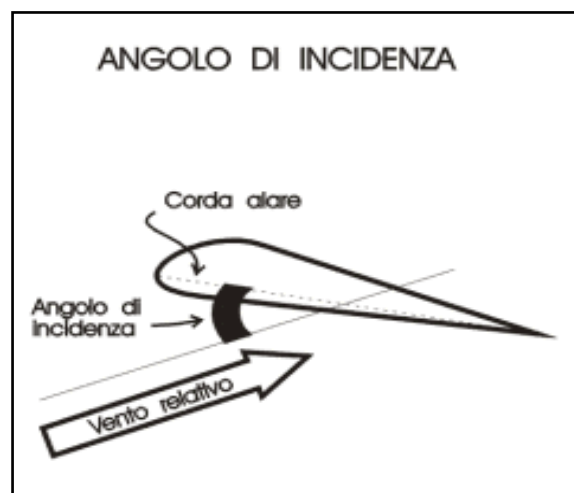


# FORZA ESERCITATA DAL VENTO SU UN PROFILO

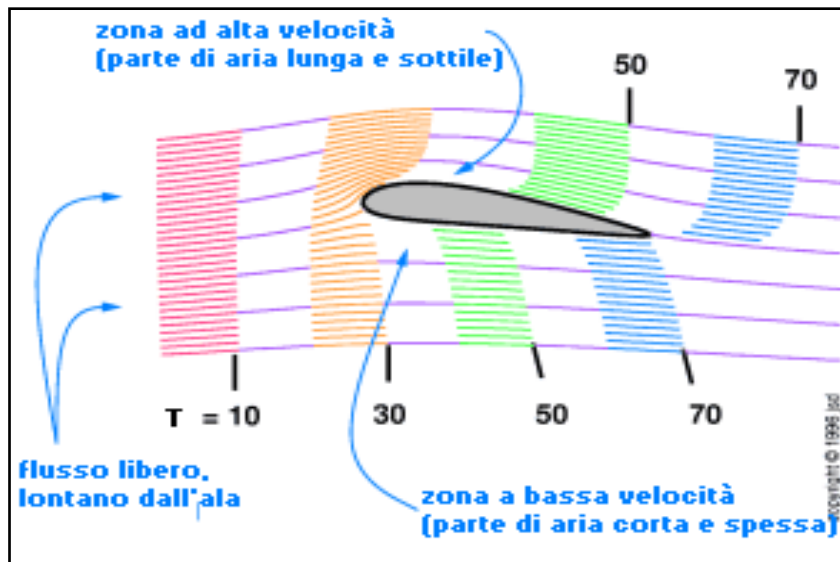
Per determinare la spinta che il vento imprime ad una turbina eolica occorre esaminare brevemente le caratteristiche dinamiche che permettono agli aerei di volare.

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 (vicino al lato sinistro del disegno) è sistemata una fila di iniettori di fumo. Il fumo viene trasportato dalla corrente rendendo visibili le linee di flusso.



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

Innanzitutto possiamo notare che l'aria davanti all'ala non si muove solo da sinistra a destra, ma anche dal basso verso l'alto, questo fenomeno viene detto upwash (deviazione verso l'alto). Allo stesso modo, una volta oltrepassata l'ala, l'aria si muove, oltre che verso destra, anche verso il basso, questo invece viene detto downwash (deviazione verso il basso). Lungo il bordo d'entrata dell'ala c'è la linea di ristagno, che è la linea di divisione fra l'aria che passa sopra l'ala e quella che passa sotto

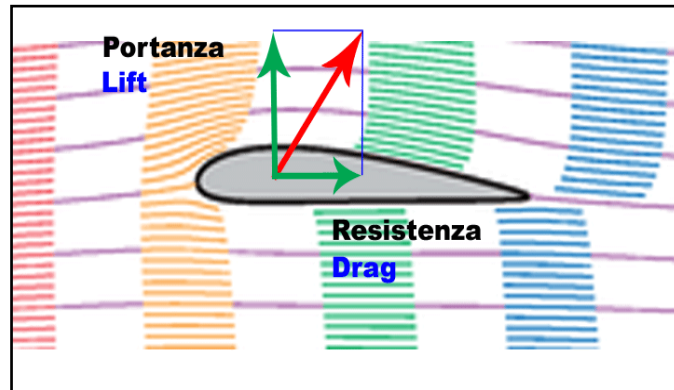
I filetti di fumo pulsanti ci danno molte altre informazioni. Le zone dove i filetti appaiono allungati sono zone di alta velocità. Ogni striscia (piena o vuota) dura esattamente 10 millisecondi, per cui se copre una distanza maggiore deve muoversi più velocemente.

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

Per contro, le zone dove i filetti pulsanti coprono una distanza minore nei 10 millisecondi, devono essere zone di bassa velocità. La velocità minima è zero, e questo si verifica davanti e dietro le linee di ristagno. La cosa più importante è che il fumo blu che passa (stretto e veloce) sul dorso dell'ala, raggiunge il bordo di uscita molto prima del corrispondente che è passato sotto l'ala.

Quindi anche se l'aria che passa sopra l'ala deve compiere un percorso più lungo, arriva dietro prima della corrispondente aria che passa sotto l'ala.

Come si vede in figura, questa differenza di velocità tra dorso e ventre dell'ala è proprio la causa della creazione di tutte quelle forze, portanza e resistenza, che utilizzano gli aerogeneratori per produrre potenza eolica.



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.

# 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:

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

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:

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

Dove  $\rho$  è la densità dell'aria, che varia con la legge:

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

Dove  $H_m$  è l'altezza a cui viene posizionata la turbina e  $\rho_0$  è la densità a livello del mare ad una temperatura di 15 C° ed alla pressione di 1 atm, e vale:

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

Sostituendo adesso nella [I],  $m^*$  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:

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

# INFLUENZA DELL'ALTEZZA DEL ROTORE

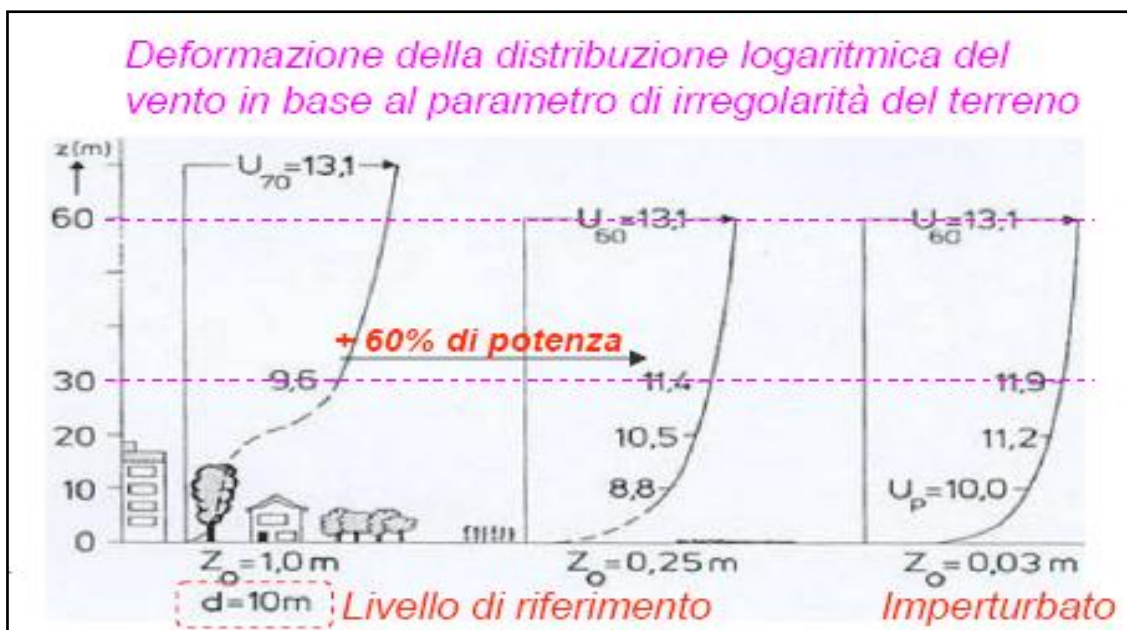
Se la velocità del vento in prossimità del suolo, al livello  $z_0$ , è pari a  $V(z_0)$ , ad una quota superiore,  $z$ , tale velocità aumenta secondo la relazione:

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

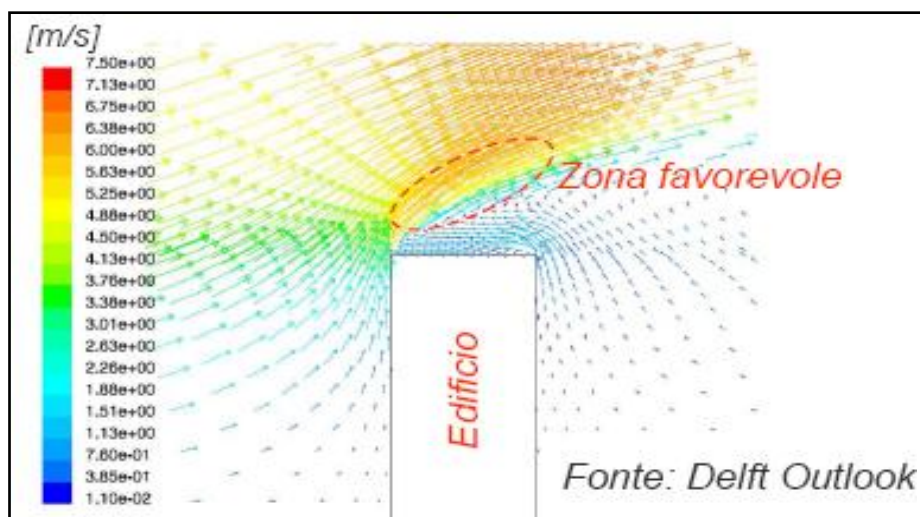
Dove  $n$  è un numero compreso tra 0 e 1, detto coefficiente di rugosità del suolo.

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.



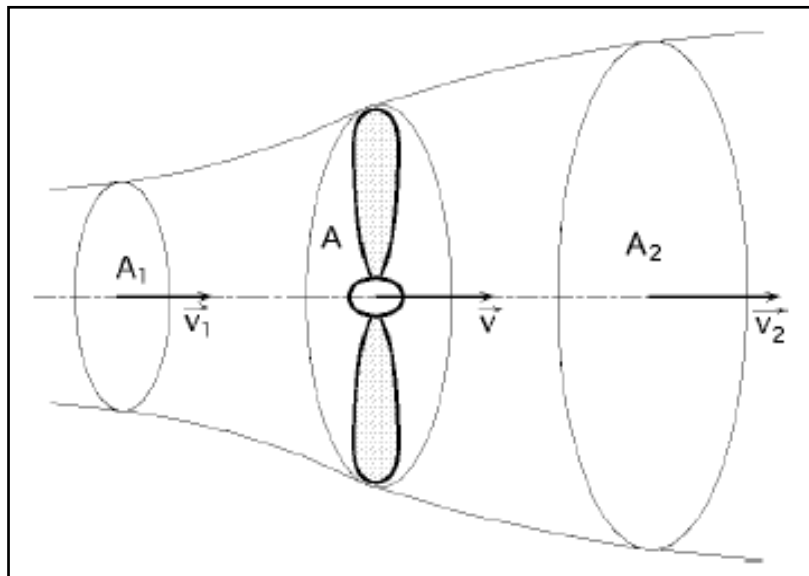
La figura ritrae la zona maggiormente favorevole nella quale installare un aerogeneratore nei pressi di un edificio, nella figura il vento proviene da sinistra e le linee rosse indicano le zone in cui c'è minor disturbo della vena fluida e quindi, dove si riesce ad estrarre la maggior potenza dal vento.



Più sono presenti asperità nel terreno, come bruschi cambiamenti di pendenza, costruzioni, boschi, montagne, più la velocità del vento sarà limitata, a tal riguardo si valuti la tabella seguente.

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

## 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:

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

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



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  $1,21 \text{ kg/m}^3$  composta dal 79% di  $\text{N}_2$  e dal 21% di  $\text{O}_2$  in volume;
- Temperatura di  $15^\circ\text{C}$  (288 K);
- Pressione di 1 atm (101325 Pa).

# IPOSTESI 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 infinitamente 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. Infatti se ipotizziamo di fermare completamente una vena in moto alla velocità di 10 m/s, l'incremento di pressione sarebbe comunque di molto inferiore al valore della pressione atmosferica (101.325Pa).

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} \rightarrow \Delta p = \frac{v_2^2}{2} \cdot \rho = \frac{100 \cdot 1,21}{2} = 60,5 \text{ Pa}$$

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

$$[\text{II}] \quad v_2 = f v_1$$

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:

- $\rho \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho \cdot v_2 \cdot A_2 = m \Rightarrow$  equazione di continuità
- $F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \cdot (v_1 - v_2) \Rightarrow$  conservazione della quantità di moto

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

La potenza istantanea che agisce sul rotore sarà:

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

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:

$$[\text{IV}] \quad vdv + \cancel{gdz} + \frac{d\cancel{p}}{\rho} + \cancel{dR} + dL = 0 \Rightarrow vdv + dL = 0 \Rightarrow \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + L = 0$$

$$L = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \Rightarrow P = \dot{m} \cdot L = \rho \cdot A \cdot v \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

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

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

Risolviendo il sistema rispetto a  $v$  otteniamo:

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

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 [V] utilizzando la relazione [II].

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

Utilizzando l'equazione [IV] e sostituendo al posto di  $v$  e  $v_2$ , rispettivamente le relazioni [VI] e [II], possiamo scrivere la forza come:

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

A cui corrisponde una potenza pari a:

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

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

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

$$[\text{IX}] \quad \frac{d\eta}{df} = 1 - 2f - 3f^2$$

Da cui otteniamo i due valori:

$$[\text{X}] \quad \cancel{f = -1} \vee f = \frac{1}{3}$$

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:

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

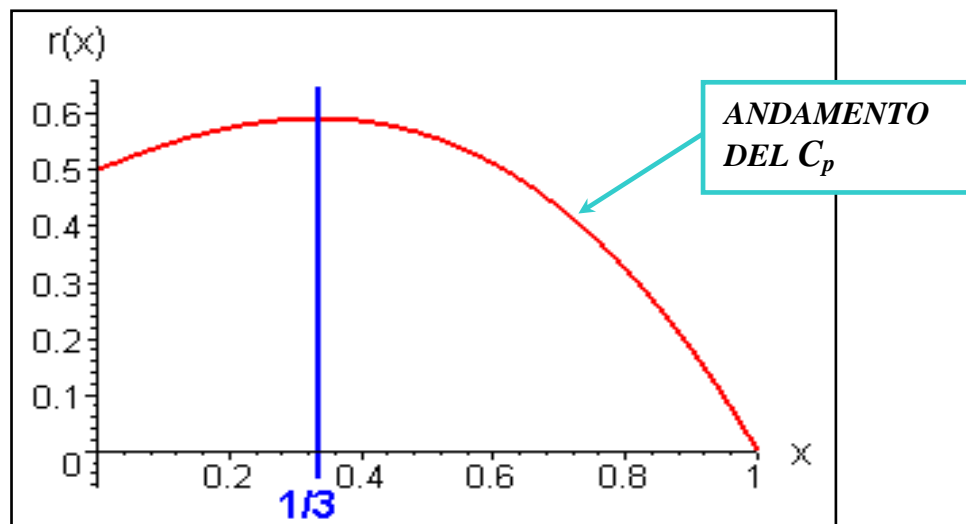
Solitamente si esprime questo rendimento come coefficiente di potenza indicato con  $C_p$ , dato dal rapporto tra la potenza che effettivamente si riesce a catturare dal vento e quella posseduta dalla vena fluida indisturbata che si muove con velocità  $v$ .

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

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

$$[XIII] \quad C_p = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

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

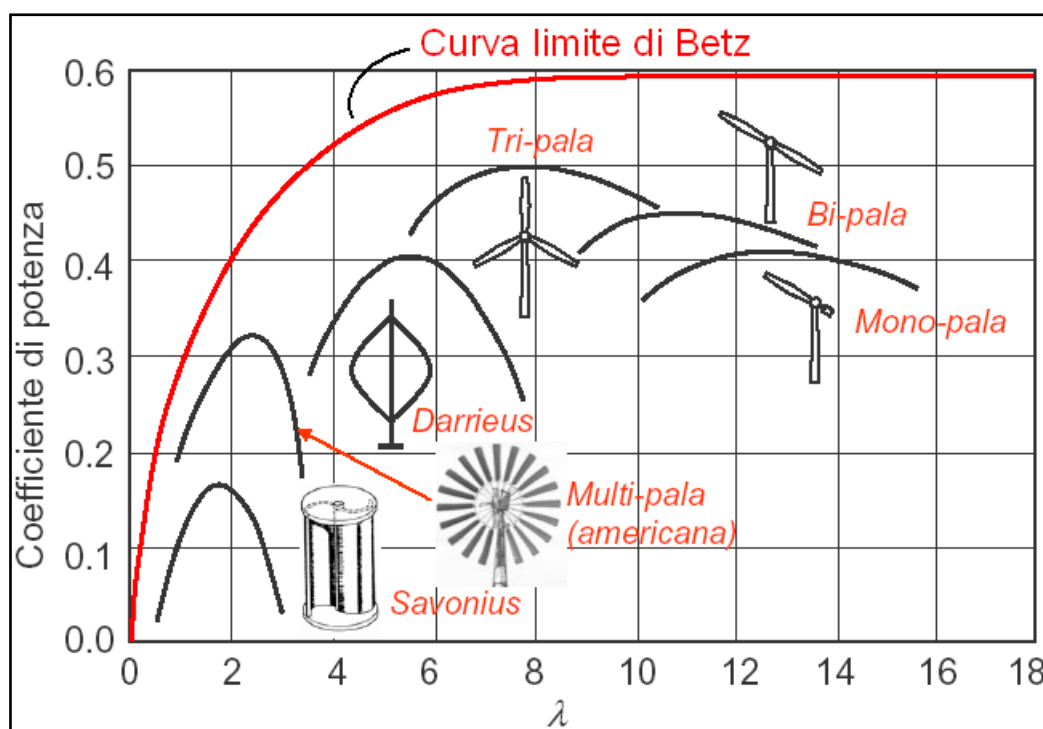


La figura mostra l'andamento del  $C_p$  (ordinata), in funzione del fattore di interferenza  $f$  (ascissa), si vede come la curva che definisce il  $C_p$  ha un massimo per  $f=1/3$  e quindi come si era accennato in precedenza, senza considerare alcun tipo di perdita, sia essa di natura meccanica 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 ari 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* ( $\lambda$ ) definito dal rapporto tra la velocità tangenziale delle pale alla loro estremità e la velocità del vento.

$$[XIV] \quad \lambda = \frac{R \cdot \omega}{u}$$







# **OBBIETTIVI DEL PROGETTO**

## **STUDIO DI FATTIBILITA' DI UN PICCOLO AEROGENERATORE CARRELLABILE**

Il progetto che andiamo 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 2000 W in condizioni di ventosità medie di 12m/s.

La soluzione cercata dovrà essere commercialmente competitiva con altri aerogeneratori presenti sul mercato.

Altra caratteristica del nostro progetto è quella di provvedere, oltre che alla produzione di energia elettrica, alla possibilità, una volta messo l' aerogeneratore in posizione di riposo e smontato dai supporti, di poter utilizzare il carrello appendice come strumento per trasportare merci.

Per questo motivo, il nostro studio inizia esaminando le caratteristiche e i dati tecnici di un carrello appendice con massa a pieno carico inferiore ai 750 kg in quanto questa tipologia può essere utilizzata da qualsiasi utente munito unicamente di patente B.

Analizziamo la soluzione: carrello appendice con aerogeneratore e valutiamo la soluzione precisando:

- *INGOMBRO*
- *EFFICENZA*
- *COSTI*
- *ESTETICA*

# VINCOLI PROGETTUALI NELLO STUDIO DELL' AEROGENERATORE

Si cerca 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 altezze dell' ordine del metro.

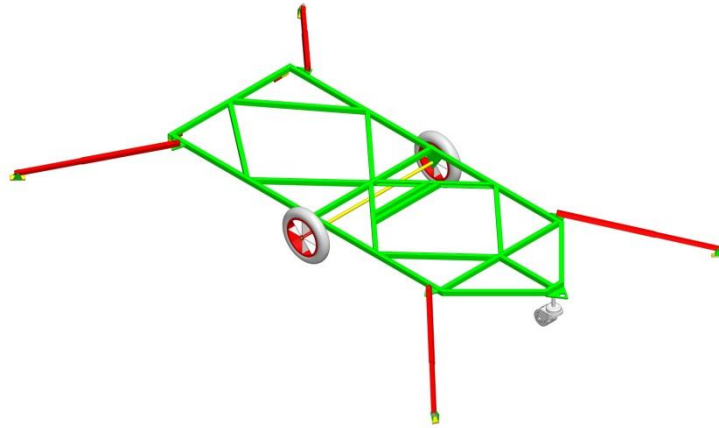
Sono favoriti i collegamenti con l' utilizzo di perni per poter consentire un montaggio facilitato direttamente sul posto, mentre per i componenti che vanno saldati si deve evitare di effettuare la saldatura nel sito di installazione, ma garantire un trasporto delle parti già assemblate.

La semplicità costruttiva e nelle operazioni di sostituzione di eventuali parti rotte e usurate deve essere privilegiata.

Per la messa in esercizio dell'aerogeneratore occorrono circa 30 minuti.

L'operazione può essere effettuata da qualsiasi persona non specializzata, in quanto la semplicità delle operazioni da effettuare non richiede nessun tipo di capacità

Per evitare problematiche dovute all' instabilità, il carrello appendice è dotato di bracci telescopici per aumentarne la superficie ( 4000mm in lunghezza e 3500mm in larghezza) di contatto con il suolo, e la torre viene vincolata a questi con funi d' acciaio. Il pianale si trova ad un' altezza di 400 mm dal suolo.



La struttura deve essere il più leggera possibile, compatibilmente con i criteri di resistenza, per far sì che il momento d'inerzia all'avviamento e la coppia resistente siano di modesta entità ottenendo un aumento della coppia massima utile riducendo, anche con l' utilizzo di materiali plastici, le vibrazioni.

La potenza nominale di progetto è di 2000W con un vento di 12 m/s che corrisponde, secondo la “scala Beaufort”, ad un vento moderato; questa potenza è ottenuta tramite un accoppiamento tra rotore e generatore.

Non è previsto nessun intervento umano durante il funzionamento della turbina che deve operare continuamente ogni qualvolta il vento lo permetta.

Sono previsti interventi di manutenzione affinché l'aerogeneratore riesca a raggiungere una vita minima di 20 anni.

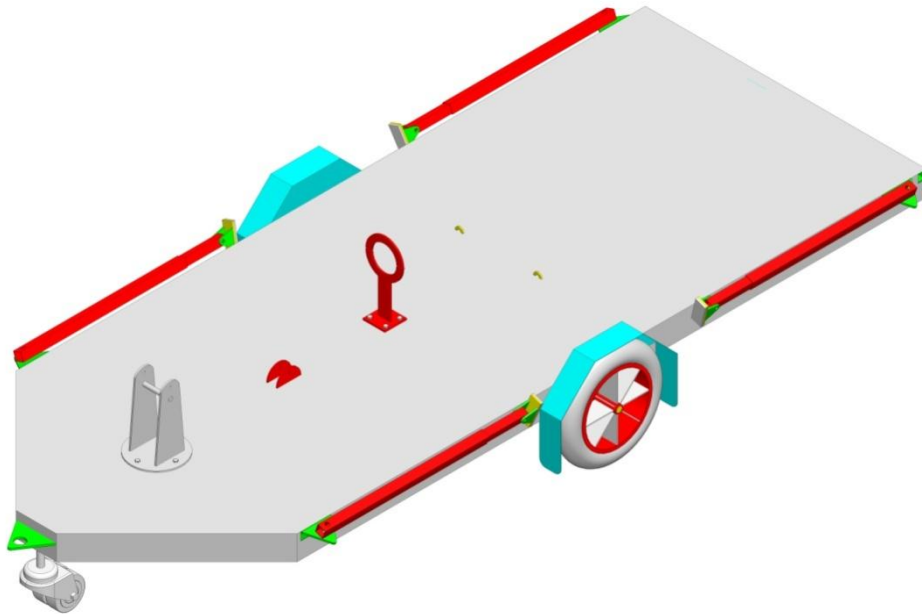
Le condizioni atmosferiche a cui la turbina garantisce un rendimento dell' 85% sono comprese tra  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Si vuole realizzare la struttura con un aspetto gradevole e il rumore deve essere di intensità trascurabile anche se l'installazione è preferita lontano dalle residenze civili per non ridurre le prestazioni, a causa di eventuali turbolenze che potrebbero generarsi dalla vicinanza turbina - abitazione.

La potenza richiesta di 2000W ha un motivo preciso, infatti questo è il fabbisogno richiesto da un abitazione 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, stabilimenti balneari, abitazioni che ancora non sono state raggiunte dalla rete elettrica nel massimo rispetto dell' ambiente e della fauna.

## ANALISI DEI COMPONENTI



Per prima cosa occorre realizzare il telaio del carrello e rendendolo idoneo sia alla circolazione su strada sia a sorreggere il peso dell' aerogeneratore. Viene impiegato del tubolare in alluminio quadrato di sezione 40 mm per 40 mm di spessore 2 mm. Per garantirne l' utilizzo occorre realizzarlo affinché sia conforme alle normative del codice della strada. E' dotato di un solo asse, al quale vengono vincolate due ruote pneumatiche ( più una terza per poterlo tenere in equilibrio), e un sistema di illuminazione per segnalare gli ingombri.

All' estremità di ogni spigolo vengono fissati 4 piedi sfilabili realizzati in tubolare quadrato da 30 mm spessore 2 mm, fino a raggiungere un estensione di 1500 mm che andranno poi ancorati al terreno per garantire stabilità al carrello in fase di esercizio (nel momento in cui la torre è elevata).

La struttura in alluminio ha una massa di circa 52 kg.

Sul tubolare è fissata una lamiera di alluminio mandorlato di 2 mm più 1 mm di mandorla ( massa 16 kg) opportunamente tagliata e piegata per dare alla struttura la rigidezza

necessaria e per impedire, qualora si salga sul carrello per eventuali operazioni di manutenzione dell' aerogeneratore, di non scivolare.

A telaio sono imbullonate le staffe per sorreggere i componenti . Il carrello è munito di un timone per poterlo agganciare, 2 ruote da 145/50/R10, ed è sprovvisto di impianto frenante per una massa complessiva di 134 kg.

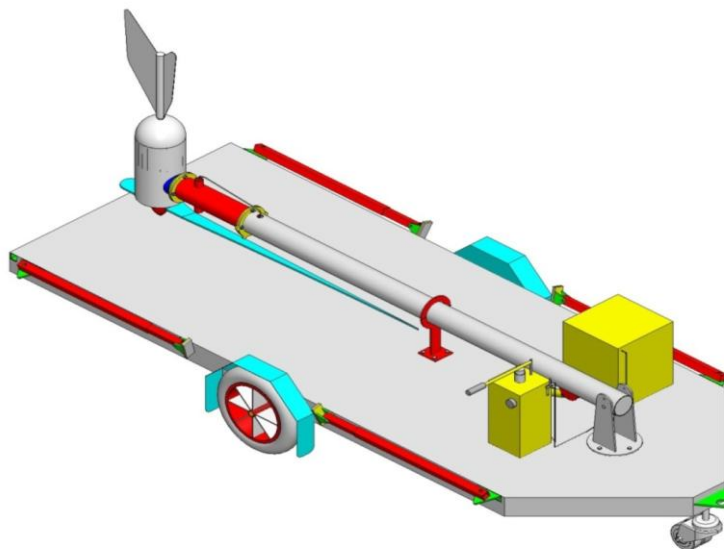
Per permettere alla torre di compiere una rotazione attorno all' asse del perno viene fissata una staffa opportunamente piegata, saldata e forata.

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

La torre è realizzata con un tubolare in acciaio INOX AISI 304 di spessore 3 mm diametro 120 mm di lunghezza 2800 mm alla quale, attraverso una flangia, è vincolato un pistone a semplice effetto in alluminio dotato di 4 sfili con un diametro iniziale di 120 mm e uno finale di 80 mm.

Questo meccanismo permette all' aerogeneratore di raggiungere e superare un'altezza di oltre 6000mm.

Per garantire la stabilità della turbina vengono impiegati dei cavi elastici vincolati ad un'estremità alla flangia del tubolare in INOX AISI 304, mentre dall'altra ai piedi regolabili che appoggiano al suolo.

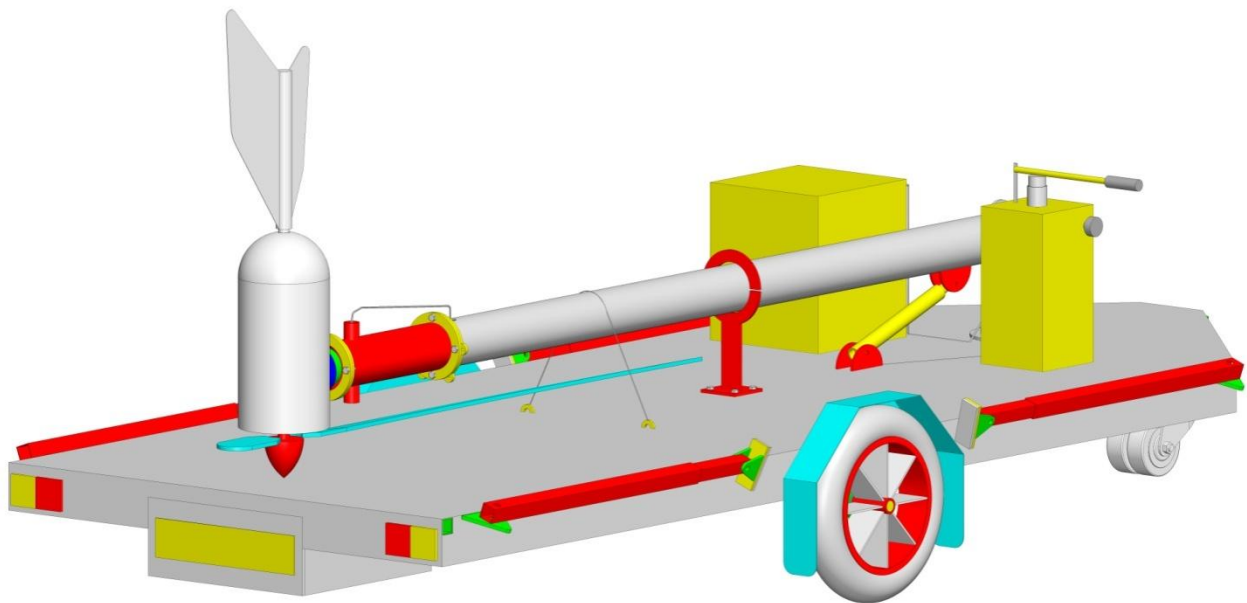


Questa è la rappresentazione di come verrà realizzato il carrello appendice con l' aerogeneratore eolico in fase di non utilizzo (es. fase di trasporto).

La scelta di un aerogeneratore mono-pala permette di rimanere entro gli ingombri prefissati: affinché questo possa succedere, occorre mettere l' asse della pala parallela all' asse della torre.

Tutti gli organi ausiliari che si utilizzano per la messa in esercizio dell' aerogeneratore verranno poi riposti nell' apposita cassetta porta oggetti situata nel retro, sotto la lamiera di alluminio mandorlato.

La figura ci permette di capire che all' interno del nostro carrello è possibile caricare altri elementi quali ad esempio valige, attrezzatura sportiva e altro fino ad un complessivo di 250 kg.



# 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 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.



# GENERATORE DI CORRENTE

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

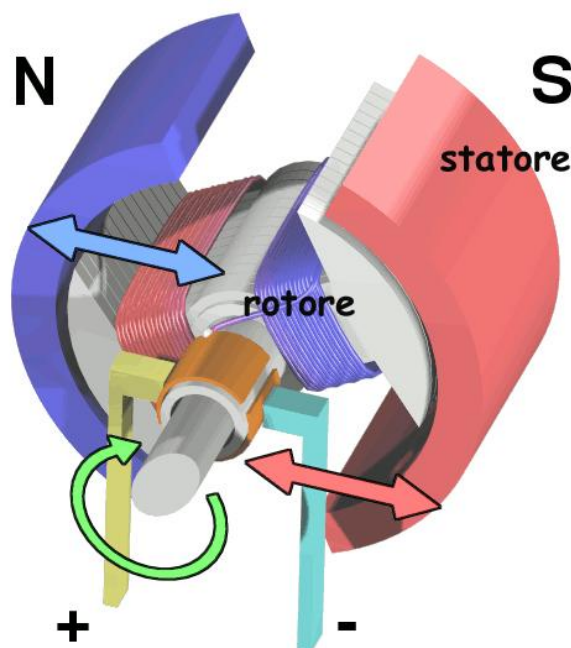
Un generatore elettrico è una macchina in cui la potenza in ingresso è di tipo meccanico e quella in uscita è di tipo elettrico.

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

Lo statore è la parte fissa del motore, ha il compito di sostenere la macchina, contiene parte degli avvolgimenti indotti o induttori installati in apposite cave.

Generalmente ha le dimensioni maggiori e conferisce al motore la geometria che lo caratterizza.

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



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

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

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

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

- **Motore in corrente continua a spazzole:** Il classico motore in corrente continua ha una parte che gira detta rotore o armatura, e una parte che genera un campo magnetico fisso detta statore. Un interruttore rotante detto commutatore o collettore a spazzole inverte due volte ad ogni giro la direzione della corrente elettrica che percorre i due avvolgimenti generando un campo magnetico che entra ed esce dalle parti arrotondate dell'armatura. Nascono forze di attrazione e repulsione con i magneti permanenti fissi (indicati con N ed S nelle figure).

La velocità di rotazione dipende da:

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

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

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

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

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

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

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

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

In un motore brushless, l'inversione di corrente è ottenuta, tramite un banco di transistor di potenza comandati da un microcontrollore che controlla la commutazione della corrente. Dato che il controllore deve conoscere la posizione del rotore rispetto allo statore, esso viene solitamente collegato a un sensore a effetto Hall, come il Pick-up o a un più preciso resolver.

#### Vantaggi:

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

#### Svantaggi :

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

## MOLTIPLICATORE DI GIRI

Il moltiplicatore di giri converte la velocità di rotazione del rotore (alta coppia, basso numero di giri) al numero di giri necessario al generatore ( nel nostro caso 374 r.p.m.).

In alcuni moltiplicatori vi è una funzione aggiuntiva che è quella di sorreggere il rotore. Questo componente viene dalla tecnologia meccanica classica, anche se nelle macchine eoliche assume un'importanza particolare perché è delicato ed è una delle fonti di generazione del rumore (oltre alle pale). Allo scopo di eliminare il costo e lo spreco di potenza vi sono stati degli sviluppi di macchine senza moltiplicatore.

I modelli di moltiplicatore in uso sono multistadio di ruote dentate, ma anche multistadio comprendenti planetari.

Il dimensionamento tiene conto dei momenti e delle velocità di rotazione in gioco in entrata e uscita.



# DIMENSIONAMENTO DEI PISTONI

Elementi molto importanti all' interno del progetto sono i pistoni che consentono l' istallazione della turbina. Grazie a questi organi le operazioni di istallazione dell' aerogeneratore sono rese semplici e permettono di operare in assoluta sicurezza.

Per ottimizzare i costi e cercare di rendere la struttura il più possibile leggera ma allo stesso tempo funzionale, andremo a fare una analisi dei pistoni per dimensionarli al meglio.

Per poter correttamente scegliere e dimensionare il pistone occorre conoscere i seguenti dati:

Pressione espressa in bar

Corsa effettiva espressa in mm

Spinta della superficie espressa in cm<sup>2</sup>

Occorre innanzitutto individuare la spinta più vicina al valore indicato nella tabella sottostante, in base al valore della spinta si può determinare il valore dell' alesaggio.

ISO		cm <sup>2</sup>	cm <sup>2</sup>
Alesaggio	Stelo	Spinta	Tiro
25	12	4,91	3,78
	18		2,36
32	14	8,04	6,50
	22		4,24
40	18	12,57	10,02
	28		6,41
50	22	19,64	15,83

	28		13,48
	36		9,46
63	28	31,17	25,01
	36		20,99
	45		15,27
80	36	50,27	40,09
	45		34,36
	56		25,64
100	45	78,54	62,64
	56		53,91
	70		40,06
125	56	122,72	98,09
	70		84,23
	90		59,10
160	70	201,06	162,58
	90		137,45
	110		106,03
200	90	314,16	250,54
	110		219,13
	140		160,22

## DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI CORSA

Per determinare il fattore di corsa bisogna conoscere il modello e il dispositivo di fissaggio.

In questo modo si può determinare il fattore di corsa:

0,50 = TP (tirante post) - FP (flangia post) - PP (perni post) - CPS (snodo post) -  
CP (cerniera femmina post) + STELO LIBERO

0,75 = TP (tirante post) - FP (flangia post) - PP (perni post)- CPS (snodo post) -  
CP (cerniera femmina post) + STELO RIGIDO

1,00 = OC (oscillante a perni centrali) - TA (tirante anteriore) - FA (flangia anteriore) +  
STELO LIBERO

1,50 = OC (oscillante a perni centrali) - TA (tirante anteriori) - FP (flangia post) + STELO  
RIGIDO

2,00 = PL (piedi laterali) - TA (tirante anteriore)- FA (flangia anteriore)+ STELO RIGIDO

#### DETERMINAZIONE DELLA LUNGHEZZA DEL CILINDRO

Per determinare la lunghezza base del cilindro (LB) bisogna calcolare la corsa effettiva (L) moltiplicandola per il fattore di corsa (FC) .  $LB = L \times FC$ .

#### CALCOLO DEL CARICO IN SPINTA

Per calcolare il carico di spinta (espresso in kN) bisogna risolvere la seguente formula:  
carico in spinta = pressione x 1000 / 9,95

#### CALCOLO DEL DIAMETRO DELLO STELO

Determinare il carico di spinta più vicino al valore indicato sulla tabella riportata qui sotto.  
In funzione del valore del carico di spinta e della lunghezza base si può determinare il diametro dello stelo.



<b>SPINTA</b>	<b>DIAMETRO DELLO STELO (mm)</b>											
	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>18</b>	<b>22</b>	<b>28</b>	<b>36</b>	<b>45</b>	<b>56</b>	<b>70</b>	<b>90</b>	<b>110</b>	<b>140</b>
<b>0,2</b>	1.800	2.200										
<b>0,5</b>	1.500	1.800	2.500	2.800								
<b>1</b>	700	970	1.600	2.400	3.800							
<b>2</b>	500	680	1.200	1.800	2.600	4.100						
<b>3</b>	400	540	850	1.500	2.000	3.600	5.500					
<b>4</b>	300	450	760	1.200	1.800	3.100	4.800					
<b>5</b>	280	380	680	950	1.600	2.700	4.400	7.000				
<b>6</b>	250	350	610	900	1.500	2.500	4.000	6.500				
<b>7</b>	200	320	550	840	1.400	2.300	3.800	6.000	9.000			
<b>8</b>		280	510	790	1.300	2.100	3.500	5.500	8.500			
<b>9</b>		260	460	720	1.200	2.000	3.200	5.100	8.000			
<b>10</b>		240	410	680	1.100	1.900	3.000	4.600	7.500	10.000		
<b>20</b>			270	360	700	1.500	2.100	3.500	5.500	9.000		
<b>30</b>			150	180	500	1.100	1.700	2.600	4.300	7.000	10.500	
<b>40</b>					400	850	1.500	2.500	3.500	6.000	9.000	
<b>50</b>					300	700	1.300	2.100	3.100	5.500	8.000	
<b>60</b>						650	1.100	1.800	2.800	5.000	7.500	
<b>70</b>						450	1.000	1.600	2.600	4.300	7.000	10.000
<b>80</b>							900	1.500	2.500	4.000	6.500	9.500
<b>90</b>							700	1.300	2.300	3.800	6.000	9.000
<b>100</b>							500	1.100	2.000	3.300	5.000	8.000
<b>200</b>								800	1.600	2.800	4.000	7.000
<b>300</b>								500	1.100	2.000	3.000	6.000
<b>400</b>									700	1.600	3.500	4.500
<b>500</b>									500	1.300	2.000	3.800

<b>600</b>									300	1.100	1.700	3.400
<b>700</b>									200	900	1.500	3.000
<b>800</b>										700	1.300	2.700
<b>900</b>										500	1.100	2.500
<b>1.000</b>										200	900	2.100
<b>1.500</b>											300	1.600
<b>2.000</b>												800
<b>2.500</b>												300
<b>KN</b>	<b>MASSIMA ESTENSIONE DEL CILINDRO</b>											

Per garantire la semplice e corretta installazione dell'aerogeneratore viene impiegata una pompa a mano e, dopo aver calcolato la quantità d'olio all'interno del circuito, viene dimensionato e montato un serbatoio di accumulo sul quale viene inserita una valvola che permette di azionare prima il pistone vincolato a telaio poi, attraverso una valvola a due vie verrà comandato il secondo pistone, quello posto in cima alla torre, per poter raggiungere l'altezza desiderata.

Nella prossima figura entrambi i pistoni sono in fase di esercizio e permettono il corretto funzionamento dell'aerogeneratore eolico.

# CONSIDERAZIONI GENERALI SUI PROFILI ALARI

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

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

In ogni profilo alare vi sono caratteristiche geometriche importanti:

$\alpha$ : incidenza geometrica

$c$ : corda

1: linea di portanza nulla

2: bordo d'attacco

3: cerchio osculatore del bordo d'attacco

4: curvatura

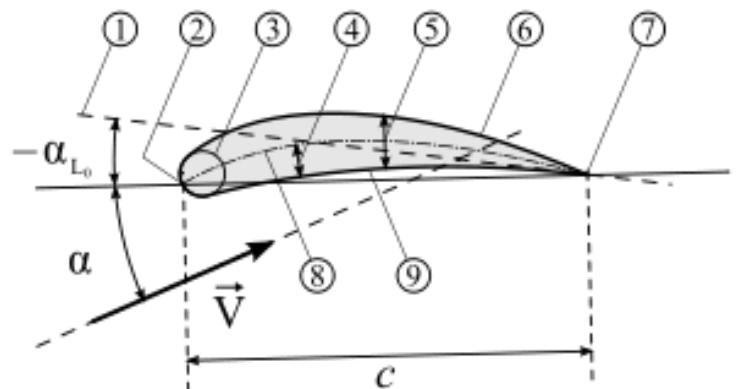
5: spessore

6: dorso

7: bordo d'uscita

8: linea d'inarcamento media

9: ventre.

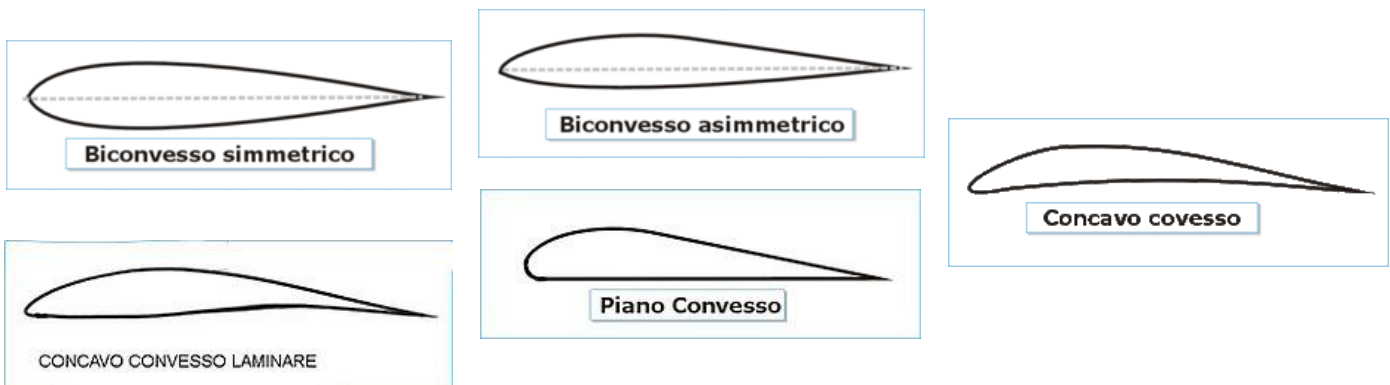


La forma dei profili alari è fondamentale per la creazione della portanza che consente al rotore della pala eolica di ruotare e quindi in seconda battuta di cedere potenza all'alternatore.

Assumono perciò una rilevante importanza anche i seguenti fattori caratteristici:

- Linea di inarcamento medio: la linea che unisce i punti equidistanti tra dorso e ventre.
- Freccia: distanza tra linea media e corda misurata perpendicolarmente alla corda.
- Linea di portanza nulla: la linea, passante per il bordo d'uscita, parallela alla direzione della corrente per la quale la portanza del profilo è nulla.
- Incidenza geometrica od angolo d'attacco geometrico: angolo formato dalla corda con la corrente indisturbata.
- Il centro di pressione di un profilo alare è il punto in cui possiamo immaginare applicata la risultante delle forze fluidodinamiche agenti sul profilo stesso.
- Il punto neutro dell'ala, detto anche fuoco o centro aerodinamico, è il punto in cui il coefficiente di momento agente sul profilo rimane generalmente costante al variare dell'incidenza. Solitamente si trova in una zona attorno al 25% della corda (quarto di corda).

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



## Diverse geometrie per i profili

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

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

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

1<sup>a</sup> cifra, valore della freccia massima in percentuale della corda (es. 2 → 0,02 c);

2<sup>a</sup> cifra, distanza dal bordo d'attacco della posizione della freccia massima, in decimi della corda (es. 4 → 0.4 c);

3<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup>, spessore massimo, in percentuale della corda (es. 15 → 0,15 c).

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

5<sup>a</sup> cifra, il raggio del bordo d'attacco, in percentuale della corda (es. 2 → 0,02 c);

6<sup>a</sup> cifra, la distanza dal bordo d'attacco del massimo spessore, in decimi della corda (4 → 0,4 c).

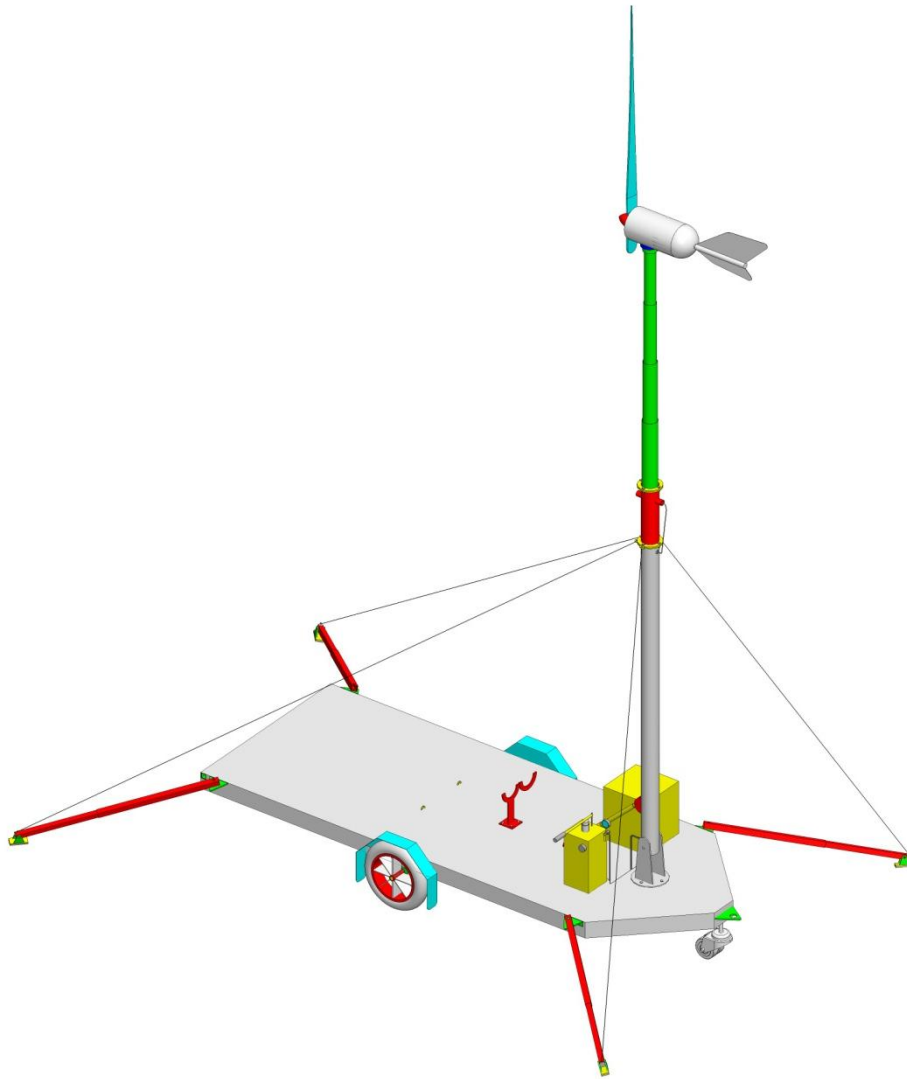
Per i profili a 5 cifre - costruiti utilizzando cinque tipi di linea media - (es. NACA 23012), esse hanno il seguente significato:

1<sup>a</sup> cifra, moltiplicata per 3/20, il coefficiente di portanza per il quale il profilo è stato progettato

2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> cifra, distanza dal bordo d'attacco della posizione della curvatura massima divisa per 2, in percentuale della corda (es. 30 → 0,15 c).

4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> cifra, valore dello spessore massimo, in percentuale della corda (es. 12 → 0,12 c).

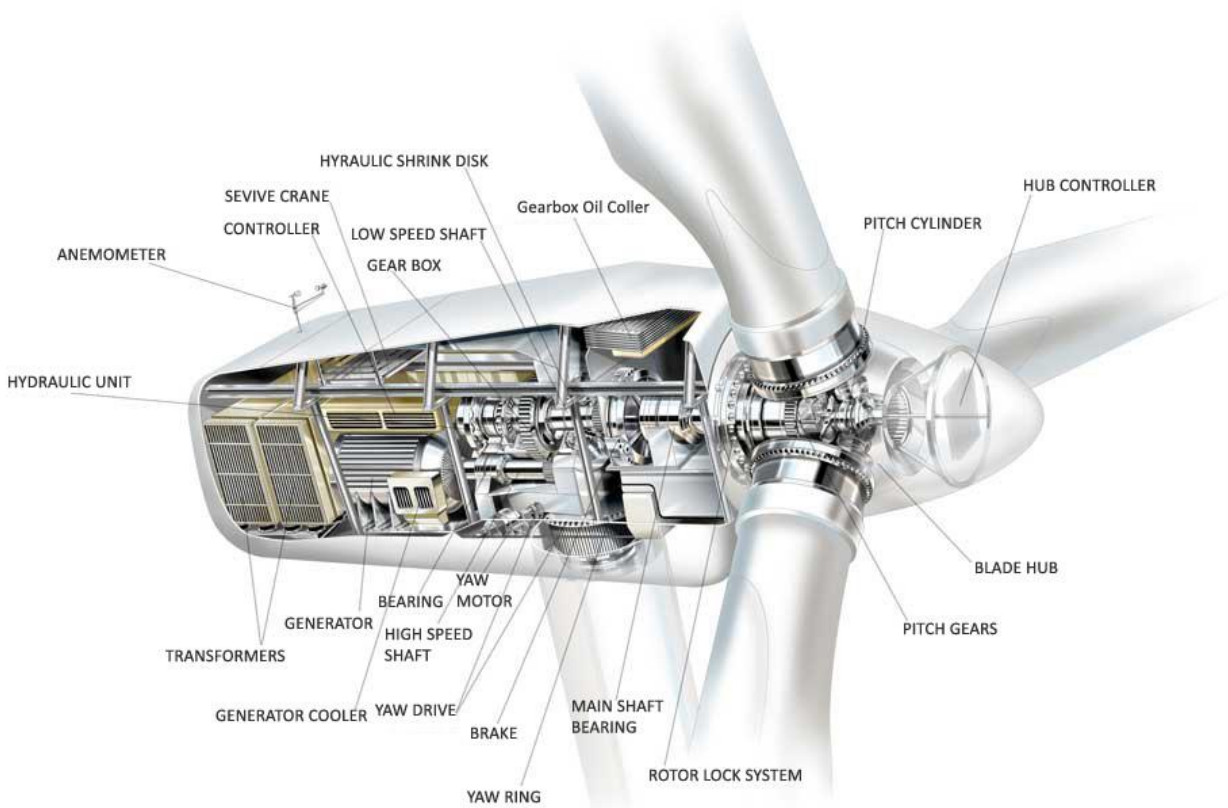
# COMPONENTI PER LA REALIZZAZIONE DEL PROGETTO



Per impedire alla torre eventuali oscillazioni verranno fissati alla flangia che rende solidale la torre con l'aerogeneratore 4 occhielli sui quali verranno agganciati dei cavetti di diametro 2 mm che poi saranno ancorati ai piedi del carrello per garantire la stabilità della torre.

Per non trasmettere a terra le vibrazioni che si vengono a creare in fase di esercizio della turbina gli organi meccanici vengono "isolati" interponendo tra i collegamenti metallici dei materiali plastici per smorzare le vibrazioni.

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



Elemento di fondamentale importanza all' interno del nostro progetto è la turbina che verrà installata.

L'aerogeneratore che andremo a monteremo richiede una velocità minima del vento di 3 m/s per poter essere messo in funzione ed eroga una potenza di 2000 W ad una velocità del vento di 12 m/s.

I giri al minuto del rotore sono molto variabili in quanto dipendono dalla velocità del vento; per risolvere questo problema si utilizzata una scatola a ingranaggi per aumentare e rendere costante la velocità del rotore e della dinamo e per permettere un avvio più facile con venti deboli.

Il nostro aerogeneratore per motivi di ingombro e per avere costi modesti è dotato di una sola pala e di un apposito contrappeso.

La frequenza emessa deve essere costante a 50 hertz perciò il rotore è collegato a un inverter.



Un inverter è un apparecchio elettronico in grado di convertire una corrente continua in una corrente alternata. Si installa un inverter Aurora PowerOne facilmente reperibile sul mercato con un rendimento di oltre il 96%, garantito a temperature comprese tra i -30 e i +50 gradi fino ad altitudini di 2500 m s.l.m.

Per realizzare il nostro prototipo si utilizza una turbina eolica orizzontale Container Shelter CS-2000 in grado di esercitare una potenza di 2000W con vento a 12 m/s.

Questa tipologia di turbina utilizza una tecnologia basata sulla saturazione magnetica con una previsione di circa 20 anni di vita. È un prodotto realizzato in acciaio INOX e necessita di poca manutenzione, inoltre è dotata di un meccanismo anti cavitazione che permette la rotazione in ogni direzione.

# DATI TECNICI DELL' AEROGENERATORE

L'aerogeneratore comprende nel suo meccanismo: ROTORE ( l' organo più importante di un aerogeneratore in quanto è il meccanismo che fisicamente “raccolgi” l' energia del vento, ALBERO LENTO ( collegato direttamente al mozzo del rotore e gira con la stessa velocità della pala), FRENO (ferma il rotore in caso di manutenzione, guasto o vento troppo forte), MOLTIPLICATORE DI GIRI ( rotismo che aumenta la velocità dei giri di un albero), ALBERO VELOCE (collega il riduttore con l'alternatore, GENERATORE ASINCRONO TRIFASE (organo elettromeccanico che genera corrente elettrica).

## 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	45m/s
velocità rotore giri al minuto	374 r.p.m
diametro del rotore	3200mm
efficienza generatore	0.85
massa	27 kg
voltaggio corrente alternata in uscita	220V a 50Hz
materiale della pala	fibra di vetro rinforzata

# VALUTAZIONE DI STABILITA'

Al fine di evitare il ribaltamento del carrello appendice ho effettuato una prova utilizzando Solidworks flow simulation ipotizzando la velocità del vento di 45 m/s con una densità dell'aria a 15 gradi Centigradi pari a  $1,275 \text{ kg/m}^3$ , una pressione atmosferica di 101,325 kPa e un moto del flusso sia turbolento che laminare.

Come rappresentato in tabella come valore di riferimento ho utilizzato 279.08 N.

## PALA EOLICA [FORZA AERODINAMICA]

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence
GG Force 1	[N]	287,854854	279,084246	276,440455	297,2391698	100	Yes

**Iterations: 151**

**Analysis interval: 61**

Dall' equilibrio effettuato calcolando i momenti applicati nel baricentro delle strutture risulta:

Momento(1) = 864.9 Nm

Momento (2) = 2184.9Nm

Facendone il rapporto si trova il coefficiente di sicurezza di 2,5.

## ANALISI DEI COSTI

Vengono riportati i costi per la realizzazione del progetto:

prezzo carrello appendice	1490 euro
prezzo turbina	950 euro
prezzo inverter	718 euro
prezzo pistone L 2800 mm	346 euro
prezzo torre INOX con staffe	115 euro
prezzo pistone ausiliario L 1000 mm	95 euro
prezzo pompa idraulica con valvola	81 euro
accessori	105 euro
<b>TOTALE</b>	<b>3890 euro</b>

Questi costi sono per la realizzazione di pochi esemplari, se ci dovesse essere richiesta di vendita del prodotto i prezzi potrebbero subire delle variazioni sostanziali.

I costi vanno considerati per la produzione di poche unità. Se ci dovesse essere richiesta da parte del mercato del prodotto, i costi per la fabbricazione dell' aerogeneratore carrellabile subirebbero delle variazioni sostanziali.

## CONCLUSIONI

Al termine di questo studio si è acquisita la consapevolezza che l'energia eolica è una risorsa versatile, gratuita e soprattutto pulita ma non sempre viene vista in maniera favorevole da parte dei soggetti interessati.

Pensare che il vento possa essere utilizzato solo per la produzione di elettricità è riduttivo; la potenza estratta può essere per esempio impiegata per pompare dell'acqua in un serbatoio, produrre energia da dissipare su una serpentina elettrica per il riscaldamento di un fluido, oppure più semplicemente per ottenere una coppia motrice da utilizzare come meglio si crede.

Ci sono casi di utilizzo molto insoliti come ad esempio negli Stati Uniti, dove alcune delle ricerche condotte sono state finalizzate all'installazione di pale eoliche per la mera produzione di vibrazioni nel terreno. Sempre negli Stati Uniti le turbine multi-pala, al pari dei mulini a vento olandesi, sono quasi diventate una icona di bellezza e spesso vengono installate senza troppe preoccupazioni relative all'impatto ambientale.



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

In merito a questa problematica è possibile ridurre al minimo gli effetti visivi sgradevoli assicurando una adeguata distanza tra gli impianti e le abitazioni, facendo uso di colori neutri e curando le configurazioni geometriche regolari ossia disponendo le macchine ben distanziate l'una dall'altra.

Alcuni studiosi hanno indicato il rumore generato dal rotore come un forte inconveniente ma sulla base delle limitazioni imposte per legge sulla distanza minima tra una abitazione e una pala eolica, spesso tale rumore viene coperto da quello prodotto dal vento stesso.

Altri studiosi sostengono l'influenza negativa che queste potrebbero avere sulla propagazione delle telecomunicazioni, ma tale interferenza allo stato attuale è al pari di un qualsiasi altro ostacolo e una adeguata lontananza degli aerogeneratori fa sì che sia del tutto trascurabile. È importante ricordare infatti che il problema era più accentuato in passato quando venivano usate pale metalliche, oggi con l'uso del carbonio e materiali polimerici la situazione è notevolmente migliorata.

Infine un'ulteriore critica che viene mossa è quella relativa alle collisioni di uccelli contro il rotore. Tuttavia è stato dimostrato come queste risultino molto contenute: le specie più influenzate sono quelle dei rapaci mentre gli uccelli migratori sembrano addirittura adattarsi alla presenza delle pale eoliche.

Un aspetto di assoluta importanza è il costo dell'investimento: con un investimento di circa 3900 euro si può installare un impianto eolico in grado di produrre 2000 W di energia elettrica; tutto questo facilmente trasportabile e posto in qualsiasi luogo. Inoltre non essendo ancorato al suolo ma montato su di un carrello appendice (quindi posto su ruote) non occorrono autorizzazioni da parte di enti specializzati nel settore.

Questo è un elemento di fondamentale importanza in quanto la burocrazia rallenta, o a volte impedisce, la realizzazione di certi progetti o impianti.

Alla luce di queste considerazioni va detto che non è sicuramente redditizio installare un generatore se non si ha una media annua di vento pari ad almeno 5m/s.

## CONSIDERAZIONI SUL PROGETTO

Alla conclusione di questo lavoro si può dire che l'aerogeneratore appare esteticamente gradevole, sviluppa una potenza di 2 kW con un vento di 12 m/s, raggiungendo una velocità di rotazione di 374 giri al minuto.

Le dimensioni ottenute sono accettabili e compatibili con quelle richieste, la semplicità costruttiva e di installazione è notevole, il numero delle parti meccaniche in movimento è ridotto al minimo riducendo drasticamente le probabilità di guasto e le spese di manutenzione ordinaria.

L'installazione non prevede fondamenta, limitando tutti gli esborsi iniziali e garantendo uno smantellamento a fine utilizzo dell'impianto, poco oneroso e un ripristino completo del sito. Il risultato a cui si è pervenuti non prevede trasporti eccezionali, avendo tutte le parti delle dimensioni limitate, trasportabili con un carrello appendice di facile reperibilità in commercio.

La manutenzione può avvenire senza l'ausilio di gru o ponteggi per il personale specializzato in quanto tutti i componenti si possono collocare vicino a terra e quindi gli interventi più semplici da eseguire.

## POSSIBILITA' DI SVILUPPO

- Integrare il sistema con un gruppo di batterie per l' accumulo dell' energia.
- Predisporre la possibilità di immettere nella rete elettrica l' energia prodotta, sfruttando gli incentivi stanziati, in modo da ridurre l' investimento.
- Integrare la produzione di energia elettrica con l' installazione ad esempio di pannelli fotovoltaici sfruttando così anche la risorsa solare.
- Adattare al carrello un sistema antifurto per preservare l' oggetto e quindi renderlo più sicuro.

Naturalmente un sistema come questo non può risolvere i problemi sulla crescita dell' inquinamento globale, ma può essere utile in tutti quei casi, nei quali è sufficiente un fabbisogno di energia da sfruttare in situazioni di emergenza o in parallelo con il sistema principale di alimentazione elettrica.

Nella speranza di aver realizzato un progetto che possa essere valutato positivamente dall'opinione pubblica, si propone al termine di questo lavoro un fotomontaggio che possa darne una idea.





# BIBLIOGRAFIA

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

## RINGRAZIAMENTI

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

Vorrei ringraziare per primi i miei genitori, mia sorella e mia nonna per la pazienza che hanno sempre dimostrato in tutti questi anni e per il supporto morale che non mi hanno mai negato e per aver creduto sempre in me.

Un ringraziamento va alla mia fidanzata Roberta per essermi sempre stata vicina in tutti i momenti difficili.

Ringrazio tutti i miei amici, dal primo all'ultimo, in particolare Junior: dopo tanti anni non so come fate ancora a sopportarmi, chi più e chi meno mi siete stati sempre vicino; siete buoni consiglieri!

Un ulteriore grazie a tutti coloro che hanno condiviso con me l'esperienza universitaria: Cazza, Fanti, Ragno, Piero, Riki, Pavel, Lombo, Carletto, Mario e Barto, con voi ho passato momenti indimenticabili, belli e brutti che siano, hanno contribuito a essere quello che sono.

Un ringraziamento speciale va ai miei soci Cristian e Samuele per avermi sempre sostenuto nel raggiungimento di questo traguardo.

Agli amici del bar: Magico, Maverik, Nerino, Sco. Toni, Samu, Elia, Piro, Giacomo, Falegname, Baulo, Teo, Vale grazie per le tante risate fatte assieme!

E' doveroso porgere un sentito ringraziamento a chi ha reso possibile la realizzazione della mia tesi ovvero il Prof. Ing. Luca Piancastelli, per la sua professionalità e disponibilità.

Un ringraziamento particolare nello svolgimento di questa tesi va a Emanuele per essere stato una buona guida tecnica.

Grazie

*Luca*