



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'INSUBRIA

FACOLTA' DI SCIENZE MM. FF. NN. – SEDE DI VARESE

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA
PER LA SICUREZZA DEL LAVORO E DELL'AMBIENTE**

***TECNOLOGIE APPROPRIATE PER
L'APPROVVIGIONAMENTO ENERGETICO NEI PAESI IN VIA
DI SVILUPPO:
IL CASO DI UNA TURBINA EOLICA AUTO-COSTRUITA.***

Relatore: Ing. Gianluca Ruggieri

Correlatore: Ing. Mario Milanesio

Tesi di Laurea di:

Andrea Bedogni

matricola 616107

Anno Accademico 2008-2009



Indice generale

1	INDICE DEI SIMBOLI	5
2	INDICE DELLE ILLUSTRAZIONI.....	7
3	INDICE DELLE TABELLE.....	11
4	RINGRAZIAMENTI.....	12
5	INTRODUZIONE.....	13
6	RICHIESTA ENERGETICA NEI PAESI IN VIA DI SVILUPPO.....	15
6.1	Situazione nei Paesi in Via di Sviluppo.....	15
6.2	Le energie rinnovabili.....	19
6.2.1	Geotermico.....	19
6.2.2	Biomasse.....	20
6.2.3	Solare fotovoltaico.....	21
6.2.4	Solare termico.....	22
6.2.5	Idroelettrico.....	23
6.2.6	Eolico.....	24
6.3	Tecnologia appropriata.....	26
6.4	La scelta del micro-eolico.....	29
7	PRINCIPI FISICI DI FUNZIONAMENTO DI UNA TURBINA EOLICA.....	31
7.1	Origine del fenomeno ventoso.....	31
7.2	Potenza estraibile e limite di Betz.....	35
8	SCelta DEL SITO IN FUNZIONE DELLA RISORSA EOLICA.....	43
8.1	Analisi morfologica del terreno.....	43
8.2	Analisi anemometrica.....	48
8.2.1	Intensità del vento.....	49
8.2.2	Direzione del vento.....	53
8.2.3	Elaborazione dei dati ottenuti.....	54
8.3	IMPATTI AMBIENTALI.....	59
8.3.1	Paesaggio ed impatto visivo.....	60
8.3.2	Impatto su flora e fauna in particolare sull'avifauna.....	62
8.3.3	Impatto acustico.....	63
8.3.4	Disturbi elettromagnetici.....	64
8.3.5	Ombra proiettata.....	64
9	CLASSIFICAZIONE DELLE TECNOLOGIE EOLICHE.....	65
9.1	Principio fisico.....	65
9.1.1	Turbine eoliche a portanza.....	65
9.1.2	Turbine eoliche a resistenza.....	71
9.2	Principio tecnologico.....	73
9.2.1	Turbine eoliche ad asse orizzontale (HAWT).....	73
9.2.2	Turbine eoliche ad asse verticale (VAWT).....	78
9.2.2.1	Rotore Savonius.....	79
9.2.2.2	Rotore Darrieus.....	81
9.2.3	Confronto tra HAWT e VAWT.....	86
9.3	Classificazione per taglia della turbina.....	88
9.4	Rotori alternativi.....	89

9.4.1	Ad effetto Magnus.....	89
9.4.2	Super generatore.....	91
9.4.3	Kitegen, eolico d'alta quota.....	92
9.4.4	Twind Technology.....	93
10	COMPONENTI DI UN AEROGENERATORE EOLICO.....	94
10.1	Rotore.....	95
10.2	Moltiplicatore di giri.....	99
10.2.1	Scatola d'ingranaggi.....	99
10.2.2	Cinghia-puleggia.....	100
10.2.3	Catene.....	101
10.3	Generatore.....	102
10.3.1	Generatori in corrente continua.....	102
10.3.2	Generatori in corrente alternata.....	103
10.3.2.1	Generatori sincroni.....	103
10.3.2.2	Generatori asincroni.....	104
10.4	Navicella.....	105
10.5	Torre e fondazioni.....	105
10.5.1	Torri a tralicci.....	106
10.5.2	Torri tubolari.....	107
11	AUTO-COSTRUZIONE DI UNA TURBINA EOLICA: IL VENTOLONE.....	109
11.1	L'idea.....	109
11.1.1	Il blog.....	114
11.2	Il VentolOne.....	115
11.2.1	Fasi dello sviluppo.....	115
11.2.2	Prototipo.....	117
11.3	VentolOne 1.1.....	117
11.3.1	Scelta del profilo.....	118
11.3.2	Realizzazione.....	121
11.3.2.1	Pale.....	123
11.3.2.2	Corpo centrale e statore.....	127
11.3.2.3	Montaggio.....	132
11.3.2.4	Tabella riassuntiva dimensioni VentolOne 1.1:.....	136
11.3.3	Prove statiche.....	138
11.3.3.1	Condizioni di svolgimento della prova statica.....	138
11.3.3.2	Svolgimento della prova.....	138
11.3.3.3	Risultati.....	139
11.3.3.4	Commenti.....	141
11.3.4	Prove dinamiche.....	144
11.3.4.1	Condizioni di svolgimento della prova dinamica.....	147
11.3.4.2	Strumenti di misurazione.....	148
11.3.4.3	Svolgimento della prova.....	150
11.3.4.4	Risultati.....	151
11.3.4.5	Commenti.....	166
11.4	CONCLUSIONI TRATTE DALLE PROVE.....	176
12	CONCLUSIONI FINALI.....	179
13	BIBLIOGRAFIA.....	181
14	SITOGRAFIA.....	183

1 Indice dei simboli

A	Area spazzata dal rotore	m^2
$C_{p,L}$	Coefficiente di potenza del profilo	
C_p	Coefficiente di potenza	
C_{pr}	Coefficiente di potenza rotorico	
C_L	Coefficiente di portanza	
C_D	Coefficiente di resistenza aerodinamica	
C_m	Coefficiente di momento aerodinamico	
C_N	Coefficiente di forza normale	
C_T	Coefficiente di forza tangenziale	
c	Fattore di forma	
c	Corda alare	m
D	Resistenza aerodinamica	N
E	Efficienza aerodinamica del profilo	
E_c	Energia cinetica	J
F	Forza insistente sul profilo	N
f	Freccia alare	m
f_i	Frequenza relativa	
g	Accelerazione di gravità	m / s^2
h	Generica altezza o lunghezza	m
i	Incidenza	°
I	Intensità di turbolenza	
k	Fattore di scala	
l	Lunghezza dell'ala	m
l_c	Lunghezza caratteristica del profilo	m
l_m	Curvatura del profilo	
L	Portanza	N
m	Massa	kg
$\dot{m}$	Portata massica	kg / s
N	Forza normale agente sul profilo alare	N
N_r	Numero di rilevazioni	
n_i	Numero di rilevazioni in una determinata classe	
p	Pressione	Pa

P	Potenza	W
P _e	Potenza estraibile	W
R	Costante gas ideali	J / (kg °K)
Q	Coppia	Nm
r	Raggio	m
Re	Numero di Reynolds	
S	Superficie alare	m ²
s	Spessore profilo alare	m
t	Tempo	s
T _n	Forza tangenziale agente sul profilo alare	N
T	Temperatura	°K
u _{apice}	Velocità sulla punta della pala	m / s
v ^o	Media aritmetica della velocità	m / s
v	Velocità del vento	m / s
W	Risultante del vettore velocità	m / s
z	Quota	m
z ₀	Rugosità	m
α	Wind shear exponent	
β	Angolo di attacco	°
Γ	Circuitazione	
δ	1 / E	
λ	Tip speed ratio	
λ _a	Allungamento alare	
θ	Angolo azimutale	°
ν	Viscosità cinematica	m ² / s
ρ	Densità	kg / m ³
σ	Scarto quadratico medio	
τ	Rapporto di trasmissione	
Φ	Diametro	m
ω	Velocità angolare	rad / s

NB:

dove non diversamente specificato valgono le precedenti unità di misura.

2 Indice delle illustrazioni

Reddito pro-capite nel mondo	15
Sviluppo economico del Mondo	16
Richiesta di energia primaria totale	17
Produzione di energia in Africa.....	18
Pozzo geotermico.....	20
Schema di un impianto fotovoltaico stand alone.....	22
Collettore solare termico.....	22
Schema di micro-idroelettrico.....	23
Crescita della capacità eolica globale	24
Capacità eolica globale.....	25
Rappresentazione schematica della formazione dei venti.....	31
Effetto della Forza di Coriolis.....	32
Potenza estraibile teorica ed effettiva.....	33
Andamento della velocità e della pressione lungo il tubo di flusso.....	35
Efficienza rotorica in funzione della Tip Speed Ratio (HAWT).....	37
Coefficiente di potenza rotorico in funzione della Tip Speed Ratio al variare del numero di pale (HAWT).....	37
Coefficienti di potenza delle macchine eoliche in funzione della loro Tip Speed Ratio.....	38
Variazione del coefficiente di potenza rotorico in funzione di λ e u	39
Potenza meccanica prodotta in funzione di u per turbina a giri costanti.....	39
Relazione tra solidità e λ ottimale per aerogeneratori ad asse orizzontale.....	40
Valore della coppia di spunto in funzione di λ	41
Bilancio energetico di una turbina eolica.....	41
Distribuzione della velocità del vento al variare della quota.....	44
Classi di rugosità in funzione della morfologia.....	44
Variazione di α in funzione della rugosità.....	46
Influenza di un rilievo sulla velocità del vento.....	47
Formazione di correnti ascensionali.....	48
Indice di deformazione delle conifere, Griggs – Putnam.....	48
Mappa di ventosità della Tanzania a 50m di altezza.....	49
Anemometro a coppe; anemometro ad elica.....	50
Rosa dei venti.....	53

Rosa dei venti locale.....	54
Distribuzione della frequenza di velocità del vento.....	56
Distribuzione di Rayleigh per il sito di Arusha (Tanzania) nel biennio 2007/08.....	57
Simulazione impatto visivo VentolOne 1.1.....	61
Pressione sonora turbina eolica	63
Profilo alare.....	65
Andamento della corrente fluida attorno al profilo (realizzato con JavaFoil).....	66
Forze agenti sul profilo alare.....	67
Angoli caratteristici.....	68
Polare di un profilo NACA 2412 a diversi valori di Re. (realizzato con JavaFoil).....	69
Andamento del coefficiente di potenza del profilo in funzione delle caratteristiche del profilo.	70
Esempi di turbine eoliche a portanza.....	71
Coefficiente di potenza a resistenza.....	72
Confronto tra coefficiente di potenza a portanza e coefficiente di potenza a resistenza.1.....	72
Funzionamento ed esempi di rotori eolici a resistenza.....	73
Mulino a vento olandese; Windmill americana	74
Turbina HAWT orientabile.....	75
Passaggio delle pale di una turbina in un'area abitata.....	77
Turbina VAWT.....	78
Rotore Savonius.....	80
Generatore Savonius doppio auto-costruito.....	81
Turbina Darrieus da 4MW nel parco eolico di Gaspé Peninsula, Quebec, Canada.....	81
Sezione di una turbina Darrieus.....	82
Forze agenti in una turbina Darrieus.....	82
Rotore Darrieus, Darrieus elicoidale, H-Darrieus Ropatec.....	86
Rappresentazione effetto Magnus.....	89
Rotore ad effetto Magnus.....	90
Nave Alcyon 2, Cousteau.....	91
Super generatore.....	91
Simulazione di generatore eolico Kitegen.....	92
Generatore Twind Technology.....	93
Maglia in fibra di carbonio.....	97
Pala in legno.....	98

Sistema di trasmissione ad ingranaggi.....	100
Sistema di trasmissione cinghia-puleggia.....	101
Catena, corona e pignone.....	101
Schema esemplificativo di una dinamo.....	103
Generatore/motore asincrono.....	104
Navicella.....	105
Rotori eolici con torre in traliccio.....	106
Torre eolica tubolare.....	107
Vista interna di una torre tubolare.....	108
Primissimo prototipo del VentolOne.....	109
Il generatore eolico di William Kamkwamba.....	110
Accoppiamento eolico-fotovoltaico.....	112
Simulazione grafica VentolOne.....	115
Confronto polari di vari profili.....	118
Confronto polari profili asimmetrici.....	119
Prima scelta tra profili alari.....	120
Officina dove è stato realizzato il VentolOne.....	122
Centina utilizzata per la costruzione delle ali.....	123
Foratura manuale del rivestimento.....	124
Longherone.....	125
Ancoraggio del longherone alla centina.....	125
Vite di regolazione angolo di attacco.....	126
Fase di montaggio dell'ala.....	126
Pale completate.....	127
Statore ed ancoraggio all'incastellatura.....	128
Corpo centrale del VentolOne.....	128
Cuscinetto conico a rulli solidale al corpo centrale.....	130
Particolare del serraggio dei bracci B.....	131
Schema di montaggio braccio B all'ala.....	132
Esploso del VentolOne 1.1.....	132
Vista dall'alto del VentolOne 1.1.....	133
Diametro minimo e diametro massimo del VentolOne 1.1.....	134
VentolOne 1.1.....	135
Accoppiamento puleggia-cinghia-alternatore.....	135

Stima potenza estraibile e rivoluzioni per minuto.....	141
Bordo di uscita.....	142
Presenza di crepe sulla centina.....	142
Simulazione grafica delle prove dinamiche.....	145
Campo di volo di Calcinat del Pesce, ACAO.....	147
Disposizione degli strumenti di misurazione.....	149
Caratteristiche alternatore.....	150
Variazione dei g/min in funzione della velocità del vento.....	152
Rappresentazione grafica CASO C.....	154
Andamento di $\lambda(v)$ CASO C.....	155
Rappresentazione grafica CASO E.....	158
Sintesi CASO E.....	159
Andamento di $\lambda(v)$ CASO E.....	161
Rappresentazione grafica CASO F.....	162
Sintesi CASO F.....	163
Andamento di $\lambda(v)$ CASO F.....	164
Svolgimento delle prove dinamiche.....	165
Collegamento tra i bracci A ed i bracci B.....	166
Confronto tra velocità di rotazione in funzione del vento.....	167
Confronto tra λ	168
Curva tipica CQ (λ).....	172
Confronto CT.....	173
Confronto visivo tra profili.....	174
Confronto E (CL/CD).....	174
Confronto CL.....	174

3 Indice delle tabelle

Aria tipo.....	32
Classi di rugosità.....	43
Scala Beaufort.....	49
Tabella riassuntiva degli effetti della turbolenza.....	51
Dati statistici riassuntivi Arusha (Tanzania).....	52
Frequenza assoluta e relativa dell'intensità del vento – Arusha (Tanzania) 2007/08.....	53
Coefficiente di resistenza al variare della forma.....	63
Confronto tra HAWT e VAWT.....	79
Confronto fra diversi materiali.....	89
Tabella riassuntiva dimensioni VentolOne 1.1.....	126
Valori di potenza estraibile e rivoluzioni al minuto stimati.....	129
Combinazioni svolte durante le prove.....	140
Tabella riassuntiva CASO A.....	142
Tabella riassuntiva CASO C.....	145
Tabella riassuntiva CASO E.....	149
Tabella riassuntiva CASO F.....	153

4 RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare:

Carla e Attilio, per i loro consigli mai fuori luogo e per il sostegno che mi hanno dato durante tutta la mia carriera scolastica e ancora di più nella vita di tutti i giorni;

Fabio, che con la sua curiosità ha saputo inconsapevolmente farmi trovare gran parte delle spiegazioni di questa Tesi;

Prof. Gianluca Ruggieri, per avermi dato un'occasione che sognavo da una vita;

Nonna Carla e Nonno Decimo, perché sono dei pilastri fondamentali;

Nonno Luigi, che mi ha tenuto compagnia durante la stesura di questo lavoro;

Chiara, il mio specchio preferito con un casino e quattro corde sulla mano;

Mario Milanese e Walter Vassallo, per avermi insegnato a lavorare un po' fuori dagli schemi;

Monica, per tutti gli anni che mi ha dedicato e continua a dedicarmi;

Fulvio, per le sue fondamentali consulenze durante la progettazione e la realizzazione di questo progetto;

Ambrogio e Zio Angelo, Michele per aver regalato pezzi e tempo a me e al VentolOne;

Gabriele, amico da una vita;

i miei compagni di corso *Pascu, Alberto, Laura, Stefania, Rondi, Davide, Luca, Fra* per aver condiviso un bel tratto del mio cammino;

un grazie anche a chiunque ha manifestato interesse, perplessità, scetticismo, curiosità verso il VentolOne in quanto ha contribuito anche lui a portare avanti questo progetto.

5 INTRODUZIONE.

Tra le principali fonti di preoccupazione per il nostro pianeta c'è il surriscaldamento del pianeta e la progressiva diminuzione dei combustibili fossili.

Nei Paesi industrializzati i piani dei governi puntano ad un incremento dell'energia prodotta a partire da fonti rinnovabili riducendo così la propria dipendenza da fonti combustibili fossili, ed all'aumento dell'efficienza energetica.

Diverso è il discorso nei Paesi in Via di Sviluppo, dove la richiesta di energia serve per soddisfare i bisogni primari delle comunità, ma dove il know how ed il livello di sviluppo tecnologico è molto basso.

Le varie attività di volontariato da me svolte nel corso degli anni grazie allo scoutismo mi hanno dato la consapevolezza che anche con piccoli gesti è possibile essere di vero aiuto e sostegno per realtà come quella africana o asiatica.

Questa Tesi di Laurea, nata durante il convegno internazionale *“Cooperazione con i Paesi in Via di Sviluppo: soluzioni appropriate per Ambiente, Energia e Sviluppo Sostenibile”* promosso dal DASS dell'Università dell'Insubria, vuole avere lo scopo di potersi mettere in gioco per poter aiutare con le conoscenze acquisite comunità nei Paesi del sud del mondo, permettendo loro di “camminare con le proprie gambe” sfruttando le capacità e le competenze della popolazione locale.

La collaborazione con l'Ingegnere Mario Milanesio ed il team del VentolOne si è instaurata successivamente e quando il Prof. Gianluca Ruggieri, che ringrazio infinitamente, l'ha proposta è stata accettata senza esitazioni. In questo modo mi è stato permesso di coniugare le conoscenze aeronautiche da me acquisite alle scuole superiori e le conoscenze ed il metodo di lavoro imparato durante gli studi universitari.

Il seguente studio sull'energia eolica e sulla fattibilità del VentolOne vuole essere un ulteriore mattone che va ad inserirsi in un contesto più grande di cooperazione e di aiuto ai Paesi in Via di Sviluppo.

La scelta di costruire il VentolOne con materiale di recupero, e non con pezzi di officina appositamente lavorati al tornio, le prove eseguite senza l'ausilio di una galleria del vento e con strumentazione facilmente reperibile, ci è sembrato più in linea con l'obiettivo di realizzare una tecnologia facilmente replicabile in qualunque parte del mondo e da chiunque, obiettivo principale per permettere l'autosufficienza a comunità rurali nei Paesi in Via di Sviluppo, dove peraltro sono presenti particolari competenze tecniche che andrebbero sfruttate. Particolare attenzione ha suscitato in me il caso di un ingegnere meccanico

proveniente dal Senegal giunto irregolarmente in Italia poiché nel suo paese natio non trovava un futuro.

La metodologia di lavoro usata durante la realizzazione del prototipo 1.0 è stata vista con simpatia dalla gran parte delle persone a cui è stato presentato il progetto, suscitando interesse ma anche scetticismo.

La seguente Tesi vuole dimostrare che lavorare in maniera “differente” è quindi possibile; i risultati conseguiti, pur non avendo ottenuto ancora un Watt, sono molto promettenti e permettono al team VentolOne di avere una solida base di partenza per sviluppare successivi prototipi.

6 RICHIESTA ENERGETICA NEI PAESI IN VIA DI SVILUPPO.

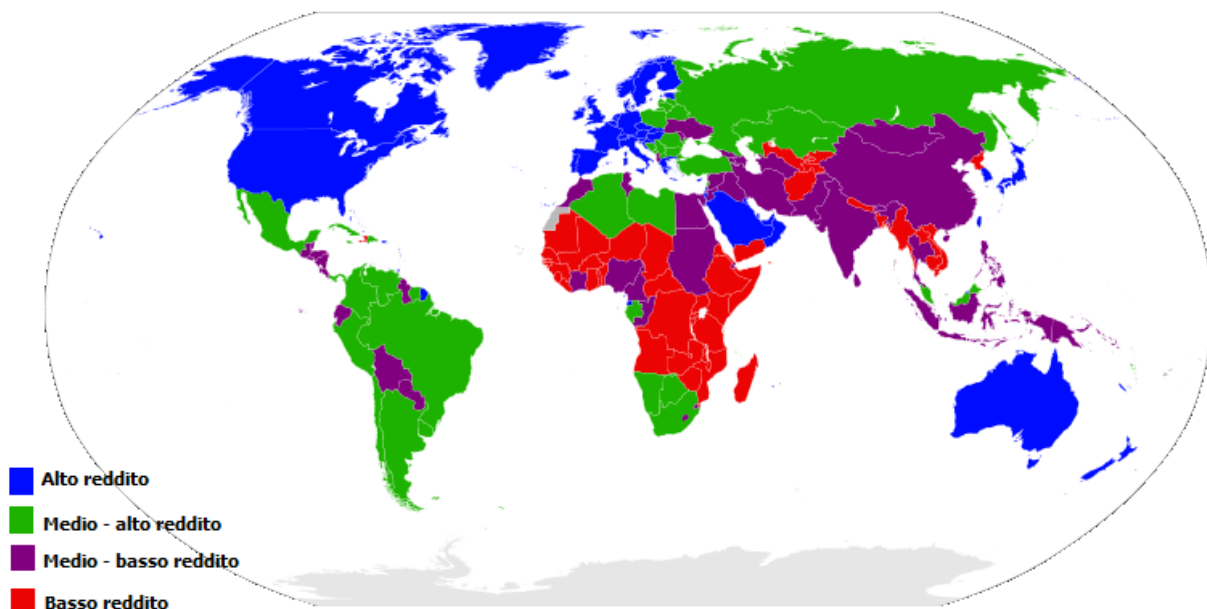
6.1 Situazione nei Paesi in Via di Sviluppo.

Per Paesi in Via di Sviluppo sono tutti quei paesi compresi nella parte I della lista stilata dall'OCSE, l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico.

Essi presentano una serie di caratteristiche comune che sono:

- bassi tassi di crescita del Reddito Nazionale;
- bassi tassi di crescita del Reddito pro capite;
- ristretta base industriale;
- poca accumulazione del capitale;
- alta percentuale di povertà assoluta;
- basso tenore di vita – come da indicatori ISU (Indici di Sviluppo Umano) circa sanità, mortalità, fame ed educazione.

Questi paesi sono concentrati nel Sud del Mondo ed in passato sono stati oggetto di colonizzazione da parte di Paesi occidentali.



1. Reddito pro-capite nel mondo (fonte: World Bank).

Il problema dei Paesi in Via di Sviluppo (PVS nel seguito) presenta degli aspetti decisamente

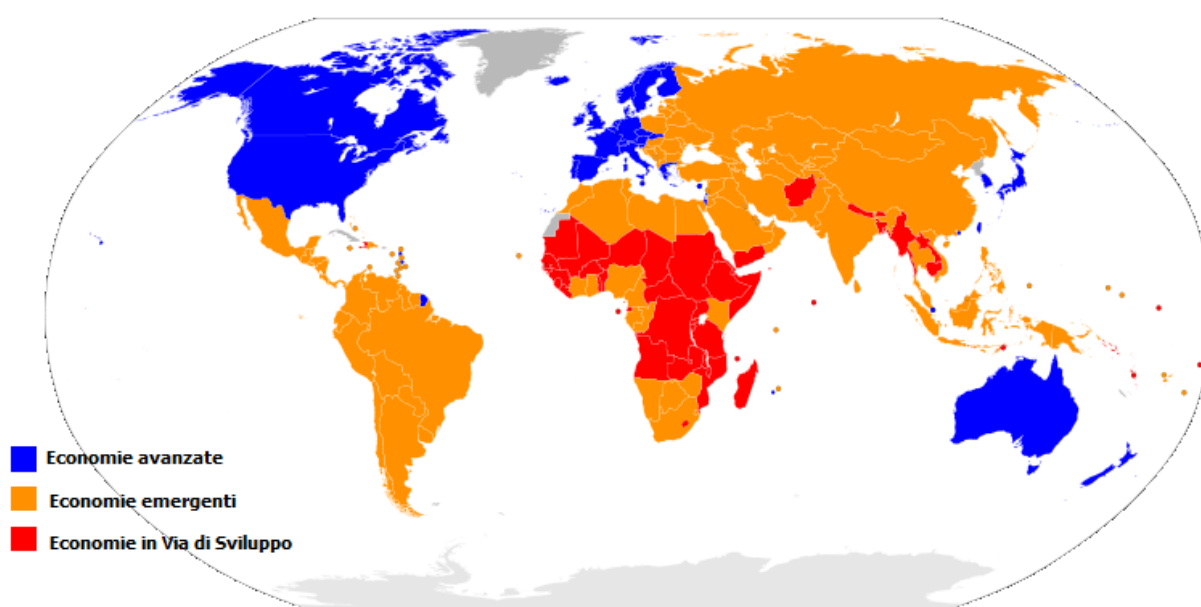
variegati, che vanno dalla presenza di acqua, alla realtà politica locale, alla presenza ed allo sfruttamento delle risorse presenti sul territorio, al grado di istruzione, alla sanità.

Un ruolo importante è stato giocato dalla colonizzazione da parte dei Paesi Ricchi che ha sottratto risorse al territorio occupato, ha modificato l'apparato sociale e governativo ed ha lasciato i Paesi occupati in balia di loro stessi una volta terminata l'occupazione.

Le notevoli modificazioni dell'apparato sociale hanno causato guerre ed instabilità politica, aumentando conseguentemente il livello di povertà già alto.

Il reddito pro-capite deve logicamente essere confrontato con il costo medio della vita, ma tuttavia offre un'idea abbastanza precisa di dove le condizioni di vita della popolazione siano meno agevoli.

È possibile e sensato fare una ulteriore analisi, andando ad identificare il livello economico del Paese.



2. *Sviluppo economico del Mondo (fonte: ONU-IMF).*

Dall'osservazione delle due figure precedenti è facile notare come le aree maggiormente interessate alla povertà siano l'Africa centrale ed alcune Nazioni asiatiche come Afghanistan, Birmania e Corea del Nord, reduci da conflitti armati risolti o in corso oppure assoggettate a dittature.

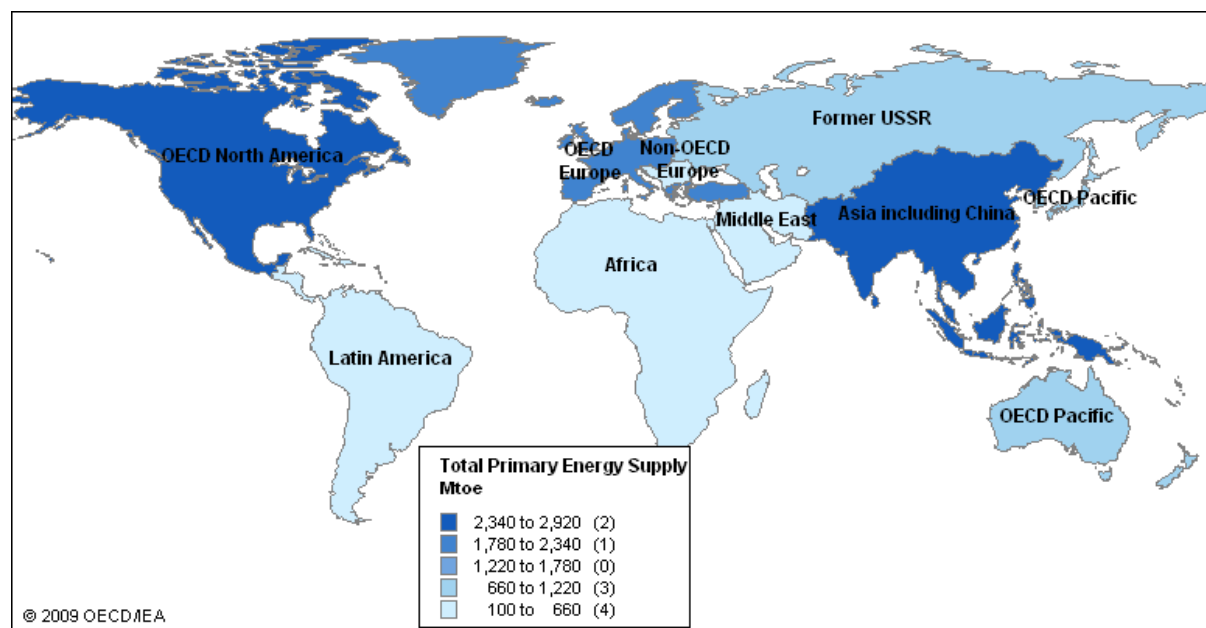
Nel valutare il contesto di sviluppo economico di Paesi con economie emergenti od in via di sviluppo assume particolare interesse la richiesta energetica di queste Nazioni.

I Paesi emergenti per poter sviluppare la loro economia necessitano di grandi quantità di energia e sono disposti ad investimenti molto dispendiosi per accaparrarsi fonti energetiche,

basti vedere l'accordo da 41,3 miliardi di dollari raggiunto recentemente tra il governo Australiano e PetroChina per la fornitura di 2,25 milioni di tonnellate l'anno di gas naturale liquefatto per un periodo di 20 anni.

Si aprono così scenari in cui Nazioni emergenti sono disposte a tutto pur di avere l'energia sufficiente per poter sviluppare la loro economia.

Situazione differente per i PVS, dove la richiesta di energia è notevolmente ridotta e serve perlopiù all'estrazione di acqua dai pozzi per irrigazione o per usi domestici, per scaldarsi e per cucinare i cibi.



3. Richiesta di energia primaria totale (Fonte: OECD/IEA).

Toe è l'acronimo anglosassone di Tonnellata Equivalente di Petrolio ed è un'unità di misura dell'energia, rappresentando la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e vale all'incirca 42 GJ. È utilizzata per comparare i varie fonti di energia.

La richiesta energetica in aree del mondo vaste come l'Africa è ancora contenuta, ma il generale aumento della popolazione ed il miglioramento delle condizioni di vita in aree geografiche quali l'America Latina ed il Medio Oriente, tenderà progressivamente ad aumentare la richiesta di energia su scala globale.

Cosa succederebbe se tutti i Paesi emergenti avessero una richiesta energetica come quella cinese?

Le conseguenze sarebbero un aumento dei costi dei combustibili fossili (petrolio, carbone, gas) ed una successiva diminuzione delle disponibilità degli stessi combustibili.

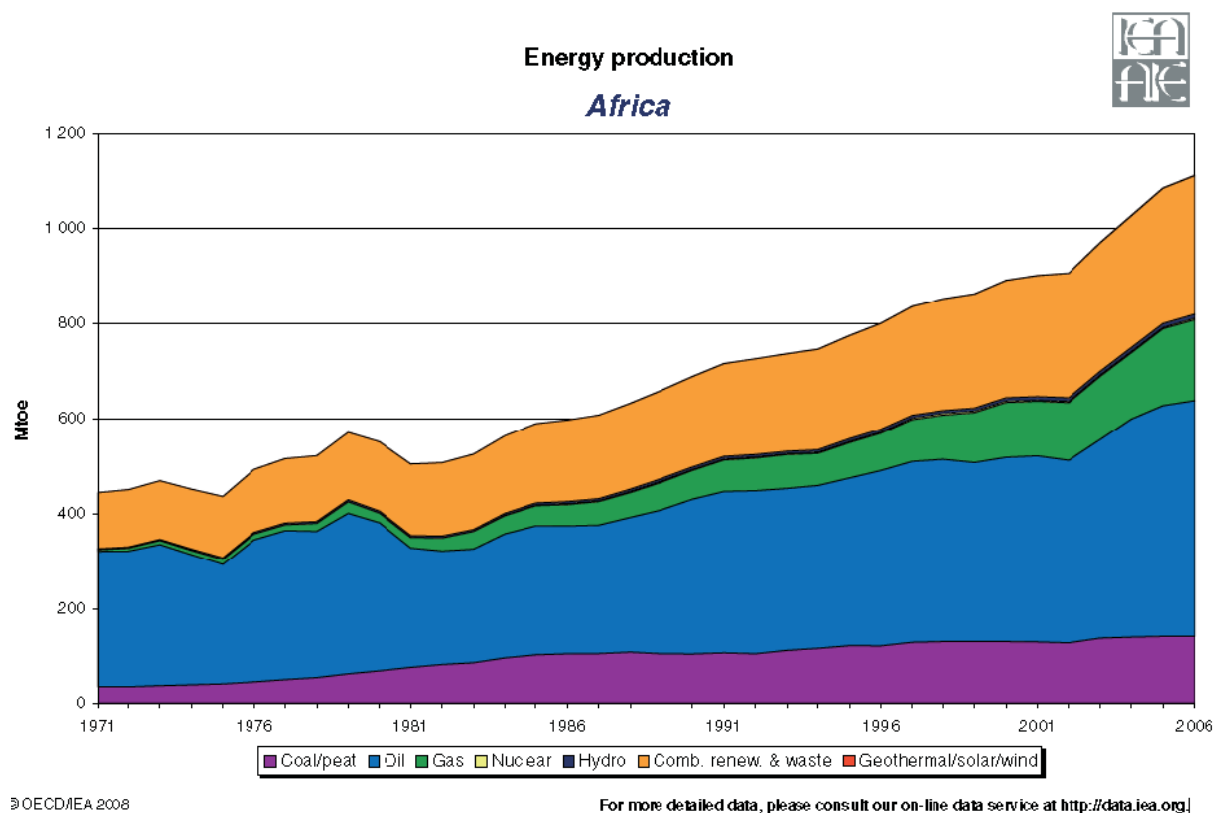
Inoltre molte Nazioni risulterebbero dipendenti energeticamente da altri Paesi, aumentando gli

squilibri ed il debito pubblico.

Attualmente la principale fonte di energia PVS è l'impiego di biomassa (legno e carbone) e di combustibili fossili.

IEA Energy Statistics

Statistics on the Web: <http://www.iea.org/statist/index.htm>



© OECD/IEA 2008

4. Produzione di energia in Africa (fonte:IEA).

La produzione di energia nel caso africano è strettamente dipendente da carbone e petrolio, mentre in arancione viene indicata l'energia prodotta partendo da legna.

Essa non è propriamente da definirsi un'energia rinnovabile, in quanto produce emissioni ed un utilizzo intensivo di tale combustibile porta ad effetti devastanti quali il disboscamento di intere foreste. Inoltre nei PVS le emissioni prodotte dalla legna provocano intossicazioni e successivi tumori a donne e bambini, in quanto passano un lasso della giornata consistente nelle abitazioni dove il carico di gas nocivi prodotte dalla combustione è elevato.

È doveroso quindi valutare le emissioni provocate dall'utilizzo di combustibili fossili in quanto l'aumento dei gas serra quali biossido di carbonio (CO₂) e monossido di azoto (NO) hanno già da tempo superato i livelli pre-industriali e superato i valori massimi degli ultimi 650000 anni, avendo come conseguenza ormai ampiamente dimostrata un aumento della temperatura del pianeta. L'aumento della temperatura causa a sua volta mutamenti climatici importanti, riscaldamento degli oceani, scioglimento dei ghiacciai, avanzamento della desertificazione in aree sensibili del pianeta.

Occorre oltretutto valutare il problema su scala locale, in quanto i gas prodotti dalla combustione di combustibili fossili e non provocano malattie di carattere tumorale o, nella migliore delle ipotesi, intossicazioni date dalla prolungata aspirazione di tali gas.

6.2 Le energie rinnovabili.

In questo contesto globale e locale si inseriscono le tecnologie che producono energia da fonti rinnovabili, come fonti energetiche di qualità.

Esse sono ancora lontane dal sostituire le fonti energia tradizionali ma presentano uno sviluppo notevole, sono gratuite e libere e non necessitano di lavoro dell'uomo per essere prodotte come succede con i combustibili fossili.

Secondo la direttiva europea 2009/28/CE l'energia prodotta da fonti rinnovabili viene definita come *“energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas”*.

Di seguito verranno brevemente illustrate le seguenti tecnologie:

- geotermico;
- biomasse;
- solare fotovoltaico;
- solare termico;
- idroelettrico;
- eolico.

6.2.1 Geotermico.

Si basa sulla produzione di calore naturale tramite l'energia termica della Terra; questo tipo di energia è localizzato in talune zone della crosta terrestre, i serbatoi termici, spesso dispersi ed a profondità elevate. Richiede un impianto che converta l'energia termica in energia elettrica, mediante l'ausilio di una turbina. Il calore può essere sfruttato direttamente per il riscaldamento delle abitazioni così come avviene in Islanda. I principali siti di produzione di energia geotermica sono in Islanda, a San Francisco, in Etiopia, mentre in Italia il principale sito è quello di Larderello in Toscana. Ad oggi la produzione di energia a partire dal geotermico non supera l'1% su scala mondiale.

Esiste un secondo modo per sfruttare l'energia geotermica ed è la *geotermia a bassa entalpia*, che sfrutta il sottosuolo, una falda o un bacino idrico come serbatoio termico dal quale estrarre calore per il riscaldamento invernale e cederne per il raffrescamento estivo.

Lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia avviene mediante l'utilizzo di pompe di calore, che estraggono o cedono energia al serbatoio di calore, e terminali di distribuzione appropriati, cioè pannelli radianti a pavimento o a parete che lavorano a bassa temperatura, quindi con temperature comprese tra 30 e 35°C.



5. Pozzo geotermico.

6.2.2 Biomasse.

Per biomassa ci intendono tutte le sostanze organiche che derivano in maniera diretta o indiretta dalla fotosintesi clorofilliana. Alcuni esempi sono: residui della coltivazione, piante coltivate per specifici scopi energetici (es: jatropha), scarti dell'industria del legno, scarti delle aziende zootecniche, frazione organica dei rifiuti solidi urbani. Questi materiali possono essere utilizzati direttamente a fini energetici mediante la combustione, oppure indirettamente tramite una trasformazione in sostanze liquide, ad esempio in biocombustibili utilizzabili nei motori di autoveicoli, o gassose (biogas), per poter essere utilizzate in appositi impianti di conversione, dove vengono bruciati fornendo calore ed energia elettrica. Un limite di questa tecnologia è la presenza della combustione per ottenere energia. Inoltre in assenza di criteri di sostenibilità il rischio è di uscire dalla definizione di rinnovabilità della risorsa; difatti è stato constatato che in alcuni casi per produrre biomassa necessario come mais si eliminino tratti di foresta, oppure si ricorra ad un'agricoltura intensiva e quindi non sostenibile per il territorio. Particolare attenzione va rivolta all'utilizzo di coltivazioni OGM che modificano durante l'impollinazione le coltivazioni autoctone, rendendo inservibili i semi per le successive annate. La popolazione locale quindi diventa dipendente dall'acquisto di semi, modificando abitudini ed aumentando i costi di sostentamento. Casi di questo genere si stanno verificando nelle piantagioni di mais in Messico.

Definiti dei criteri di sostenibilità le prospettive per lo sviluppo e l'utilizzo dei biocombustibili e delle biomasse in genere sono buone, soprattutto in paesi con ampie superfici libere ed in

PVS, creando un piccolo indotto economico mediante l'agricoltura e strappando alla desertificazione zone aride o semi aride.

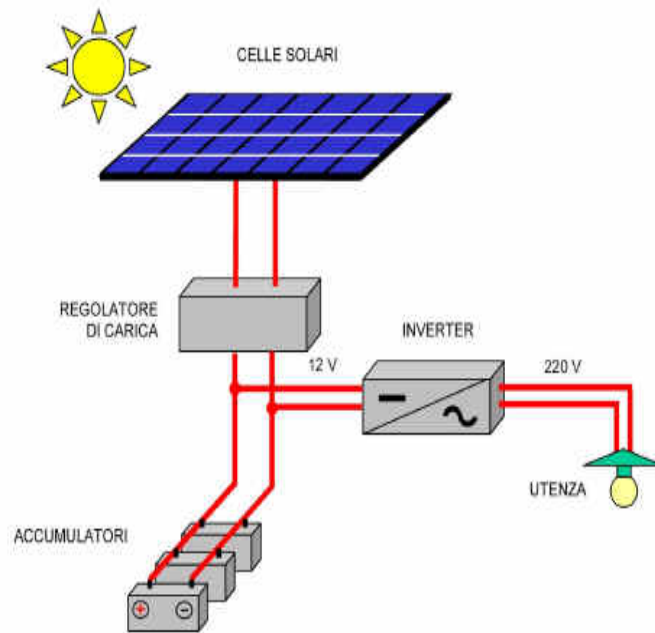
6.2.3 Solare fotovoltaico.

Rappresenta il modo più pulito e sicuro per produrre energia elettrica, se consideriamo la fase di esercizio dell'impianto. La luce proveniente dal Sole viene captata da un pannello formato da celle di materiale semiconduttore (generalmente silicio) rompendo i legami degli elettroni nel semiconduttore stesso. Gli elettroni sono quindi liberi di muoversi nel materiale semiconduttore creando una coppia di cariche libere di segno opposto: la carica negativa è costituita dagli elettroni, quella positiva dagli spazi lasciati liberi da questi ultimi, dette lacune. Gli elettroni tenderanno a spostarsi verso gli spazi lasciati vuoti. Tutto ciò richiede una differenza di potenziale ottenuta in un pannello tramite due strati sovrapposti di silicio *drogati*, uno con l'aggiunta di fosforo (silicio “n”) mentre l'altro viene drogato con boro (silicio “p”). I due strati sono collegati mediante un conduttore al quale si può collegare un carico. Il solare fotovoltaico produce in corrente continua (CC); per utenze in corrente alternata (AC) è necessario l'utilizzo di un *inverter*. Attualmente il materiale più usato è il silicio utilizzato in forma monocristallina, policristallina, oppure amorfa, arrivando ad avere un'efficienza di conversione del 20% nel caso del silicio cristallino.

Esistono inoltre materiali innovativi quali tellururo di cadmio (CdTe), solfuro di cadmio (CdS), arseniuro di gallio (GaAs) utilizzati in film sottili (spessore: 1 μm). Le tecnologie a film sottile finora coprono solo una frazione marginale del mercato mondiale, ma si stanno rapidamente affermando.

La tecnologia del fotovoltaico è di sicuro interesse in zone e Nazioni dove non è ancora stata sviluppata una rete elettrica ben articolata, poiché la costruzione e l'utilizzo di impianti stand alone (impianti solitari non collegati alla rete elettrica nazionale) è semplice e soddisfa la richiesta di energia elettrica durante tutta la giornata, anche mediante l'ausilio di batterie. Particolare attenzione viene posta all'installazione di impianti o semplici pannelli fotovoltaici nei PVS.

Sulla scena mondiale il fotovoltaico sta avendo una crescita esponenziale passando da 3,44 GW installati nel 2007 ai 6,85 GW installati nel 2008. Probabilmente nel 2009, a causa della situazione economica mondiale e della modifica della politica di incentivi in alcuni paesi, questa crescita subirà un arresto, ma i mercati rimarranno a dimensioni inimmaginabili solo qualche anno fa.



6. Schema di un impianto fotovoltaico stand alone.

6.2.4 Solare termico.

I collettori solari hanno la capacità di convertire una grande parte dell'energia elettromagnetica in energia termica, sfruttando la capacità di alcuni materiali di scaldarsi e cedere il calore rapidamente.

Tramite questa tecnologia è possibile avere acqua calda disponibile per il riscaldamento delle abitazioni oppure per usi sanitari e domestici.



7. Collettore solare termico.

Il Sole riscalda un pannello captante che a sua volta cede il calore accumulato ad un fluido termo-vettore oppure direttamente al fluido da utilizzare.

Il fluido scaldandosi tenderà a salire per densità nel serbatoio di accumulo posto in cima al

pannello dove cede calore all'acqua nel caso si utilizzi un fluido termo-vettore oppure può essere direttamente utilizzato nel caso in fluido evolvente sia acqua. In questo caso si dovrà provvedere al continuo riempimento del serbatoio di accumulo ed il sistema verrà definito aperto.

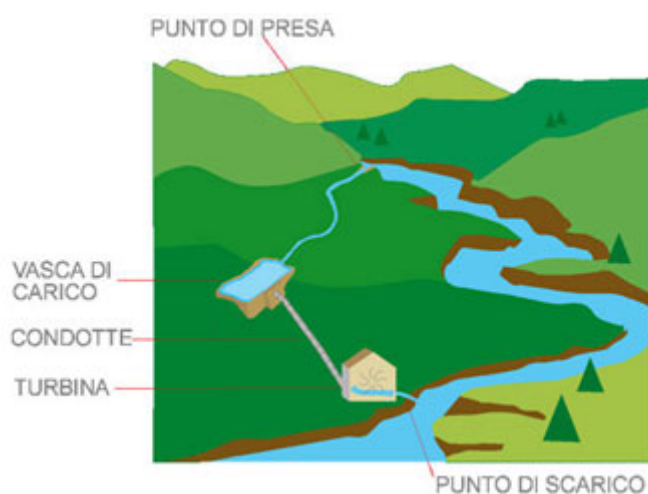
Nel caso si utilizzi un fluido termo-vettore il sistema verrà definito chiuso.

I vantaggi rappresentati da questo sistema sono il risparmio di risorse e le mancate emissioni di gas serra o inquinanti.

6.2.5 Idroelettrico.

Si basa sullo sfruttamento dell'energia cinetica posseduta da una massa d'acqua in movimento. L'acqua, raccolta in un bacino artificiale o naturale, viene convogliata tramite tubazioni ad una turbina dove il fluido evolve cedendo la propria energia alla turbina stessa. Essa a sua volta mette in movimento un alternatore che produce energia elettrica.

L'energia cinetica dell'acqua può essere sfruttata azionando le pale di un mulino, estraendo così energia meccanica. Anticamente questo sistema era molto sfruttato, cedendo il passo solo dopo l'avvento della macchina a vapore e dell'energia elettrica facilmente accessibile.



8. Schema di micro-idroelettrico (Fonte: www.casasoleil.it).

Nei PVS si sta sempre più diffondendo l'utilizzo del micro-idroelettrico, tramite lo sfruttamento di piccoli salti e l'utilizzo di piccole turbine per la produzione di energia elettrica da pochi Watt fino a 100 kW. Inoltre questo tipo di tecnologia non richiede la costruzione di dighe né sbarramenti di un certo livello, limitando gli impatti ambientali locali.

Il micro-idroelettrico si presenta quindi come una risposta convincente al fabbisogno di energia in zone rurali; oltretutto i contenuti tecnologici possono essere relativamente bassi: esistono infatti esempi di impianti micro-idroelettrici auto-costruiti partendo da una vecchia

lavatrice.

Secondo dati forniti dall'associazione dei produttori europei l'energia prodotta dal micro-idroelettrico attualmente è di 37 GW (fonte ESHA).

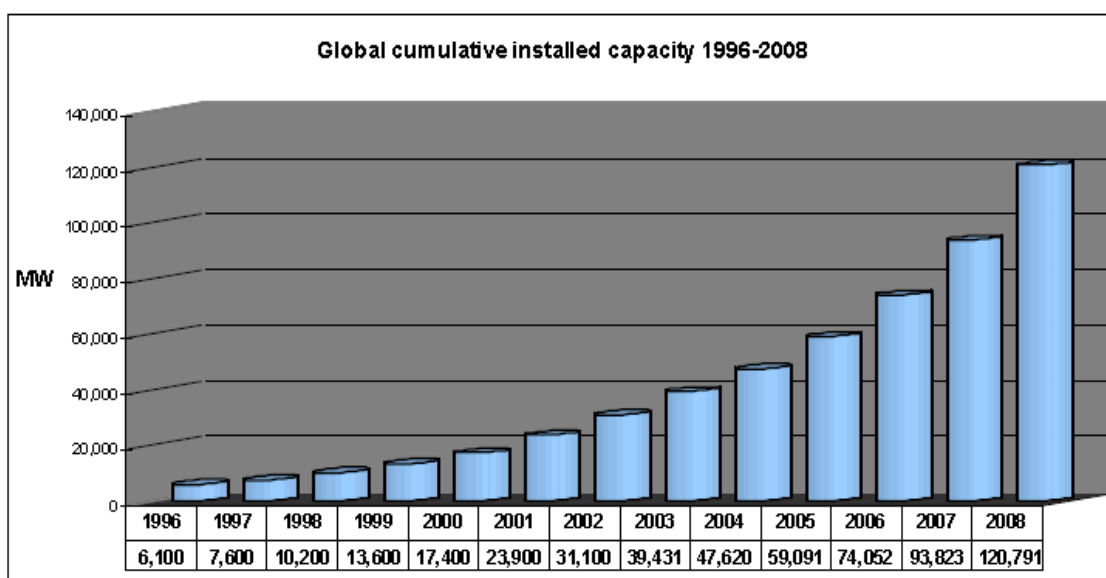
6.2.6 Eolico.

L'energia eolica si basa sullo sfruttamento della risorsa vento. Le masse d'aria in movimento possiedono energia cinetica che viene convertita in energia meccanica da turbine eoliche appositamente progettate. A loro volta le turbine possono convertire l'energia meccanica in energia elettrica oppure azionare una qualsiasi macchina operatrice.

Lo sfruttamento dell'energia posseduta dal vento avviene fin dall'antichità tramite la propulsione a vela di imbarcazioni e l'utilizzo di mulini a vento utilizzati per macinare il grano o per il sollevamento di acqua. I resti di alcuni mulini a vento sono stati trovati nei pressi di Alessandria d'Egitto e si pensa possano risalire al 3000 a.C.

In Europa la costruzione di mulini a vento è stata di fondamentale importanza per la crescita e lo sviluppo dei Paesi Bassi, dove tale tecnologia veniva adoperata per strappare al mare le terre su sono sorte città e campi coltivati.

Analogamente a quanto successo per lo sfruttamento dell'energia idrica, l'avvento della rivoluzione industriale e lo sviluppo della macchina a vapore ha fatto decadere l'utilizzo di mulini a vento.



Source: GWEC

9. Crescita della capacità eolica globale (Fonte: GWEC).

Nei Paesi industrializzati l'energia eolica sta prendendo ancora piede per via dell'instaurarsi di una coscienza ambientale sempre maggiore, che ha portato i principali Stati produttori di gas

serra a stabilire degli obiettivi di riduzione delle emissioni di tali gas tramite il Protocollo di Kyoto.

In questo contesto si inseriscono le energie rinnovabili tra cui appunto l'eolico.

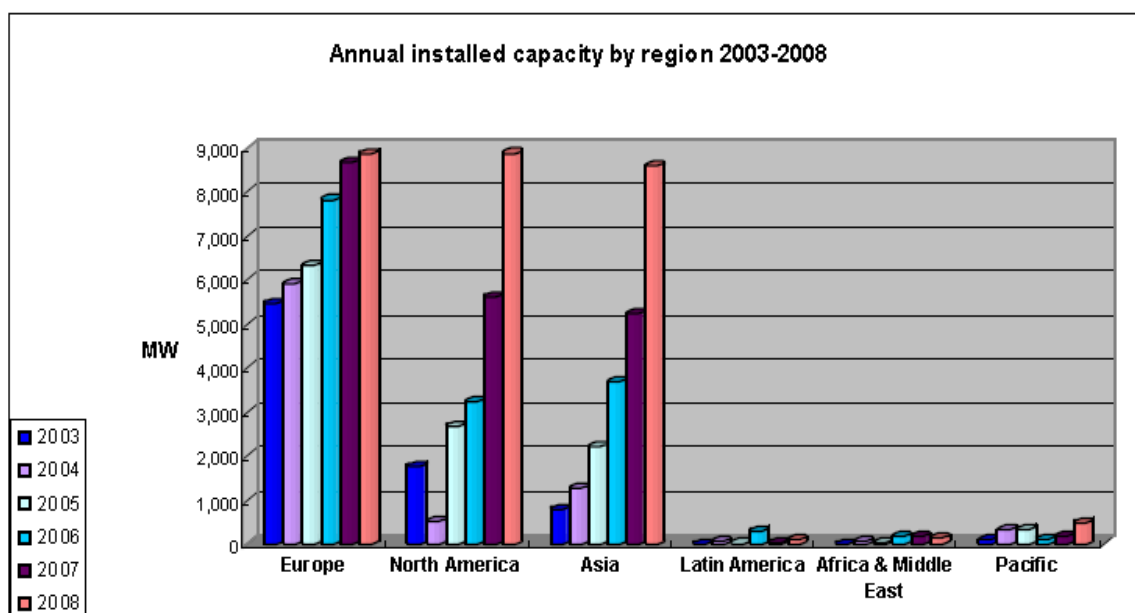
Attualmente la crescita della tecnologia eolica si attesta intorno al 30% ogni anno andando a valutare le installazioni globali.

Nel 2008 la capacità eolica installate sfiora i 121 GW, producendo globalmente energia per 260 TWh, ed evitando emissioni per 158 milioni di tonnellate di CO₂ ogni anno.

La crescita di questa tecnologia è stata resa possibile tramite incentivazioni ed investimenti statali i quali hanno portato, soprattutto in Danimarca e Germania, a sopperire ad una buona fetta della richiesta energetica nazionale. In Germania l'eolico soddisfa il 5% della richiesta totale di energia, in Danimarca il 13,4% grazie anche all'avvento di impianti innovativi off-shore (fonte EWEA, statistiche aggiornate al 2006).

Nelle aree meno sviluppate del pianeta il grande eolico (installazioni nell'ordine dei MW) non è ancora una realtà, in quanto esige investimenti che solo pochi Paesi sono in grado di fare. In Africa la produzione di energia a partire dalla risorsa eolica è confinata a poche Nazioni quali Egitto, Marocco, Tunisia ed in maniera minore da altri stati, con un contributo irrisorio, per un totale di 584 MW.

La distribuzione globale di capacità eolica è la seguente:



10. Capacità eolica globale (fonte: GWEC).

Nei PVS l'approvvigionamento energetico tramite grande eolico è in molti casi impossibile da realizzare. Si ricorre quindi ad impianti micro e mini eolici, cioè impianti di capacità fino a

100 kW, poiché facili da installare e soprattutto aventi costi di installazione e gestione relativamente ridotti. Inoltre le tecnologie micro e mini eoliche sono versatili e possono essere utilizzate sia per la produzione di energia elettrica, sia per la movimentazione di macchine operatrici.

Torneremo nel seguito a occuparci nel dettaglio di questa tecnologia.

6.3 Tecnologia appropriata.

Non tutte le tecnologie sopra descritte possono adattarsi alla realtà dove viene richiesta energia.

Citando *E.F. Schumacher* le tecnologie appropriate sono quelle tecnologie che rispettano le seguenti caratteristiche:

- *generano un'occupazione significativa*, intesa come un lavoro a cui attribuire un significato;
- *vengono comprese dagli utenti*;
- *siano riparabili e replicabili dagli utenti*;
- *riducono l'impatto ambientale*.

Gli obiettivi che l'introduzione di una tecnologia appropriata si pone sono i seguenti:

- *aiuto alla popolazione al livello base*;
- *occupazione per la popolazione*;
- *sostenibilità e durata nel tempo*;
- *utilizzano le risorse locali*;
- *promuovere la consapevolezza della popolazione locale*;
- *incoraggiare la popolazione ad autosostenersi*;
- *costo limitato*;
- *limitare i danni culturali*;
- *limitare i danni ambientali*.

Una tecnologia appropriata tocca vari ambiti non solo tecnici ma anche economici, culturali e sociologici.

Le tecnologie rinnovabili stanno avendo una rapida crescita nei PVS per via della speranza di modernizzare l'agricoltura e le condizioni di vita con soluzioni a basso costo.

La scelta della tecnologia deve rispondere ai bisogni reali delle comunità nelle quali andrà ad inserirsi ed adattarsi alle risorse presenti sul territorio, non viceversa. L'appropriatezza di una tecnologia si può definire quindi unicamente in base al contesto in cui viene considerata: lo

stesso approccio potrebbe essere appropriato in un contesto e assolutamente inappropriato in un altro.

È perciò inutile cercare di irrigare un'area rurale dove non è possibile farlo per via delle scarse risorse idriche ed energetiche. Questo comportamento altererebbe uno stile di vita, oltre al fatto che andrebbe ad influire negativamente sui costi diventando antieconomico.

In questo caso sarebbe molto più sensato andare ad agire sullo spreco di acqua e di energia, sulla captazione delle acque di pioggia, sul controllo dell'erosione del terreno, sull'uso dei fertilizzanti e cosa non meno importante sul cambiamento delle pratiche agricole attraverso l'introduzione della rotazione delle coltivazioni.

Le tecnologie appropriate non sono solo macchinari ma anche pratiche di vita comune che vanno ad agire su un utilizzo consapevole delle risorse, non avendo solamente a che fare con l'energia ma anche con medicina, agricoltura, trasporti, etc.

Inoltre si deve necessariamente valutare l'impatto che tali tecnologie hanno sull'aspetto socioculturale della realtà nel quale sono inserite.

L'inserimento di una tecnologia come ad esempio l'adozione di stufe migliorate presenta dei vantaggi in quanto permette una riduzione delle emissioni nocive nelle abitazioni abbassando i livelli di mortalità infantile ed i tumori nelle donne, permettendo anche un consumo minore di legna con conseguente diminuzione della deforestazione. Servendo meno legna le donne addette alla raccolta si trovano del tempo da occupare, ad esempio nell'agricoltura, nel commercio oppure nella propria istruzione. Si vanno a creare alterazioni degli equilibri riguardo i ruoli tradizionalmente occupati nella comunità, alterazioni che possono comportare dispute. Si deve quindi valutare attentamente gli effetti prodotti dallo sviluppo tecnologico sulla comunità, che in realtà arretrate come quella africana presenta un fitto intreccio di ruoli e tradizioni da rispettare.

Un'ulteriore modificazione è data dalla migrazione della popolazione verso la tecnologia provocando l'abbandono di zone rurali a favore di aree e villaggi dove sono presenti delle comodità, ad esempio una pompa, o l'elettricità.

Occorre chiedersi al termine dello studio di fattibilità se la tecnologia che si pensa di inserire è ancora una tecnologia appropriata.

L'innovazione deve anche essere percepita non come un traguardo raggiunto ma come l'inizio di uno sviluppo portatore di benessere. Il benessere non può essere inteso nei termini europei, quindi come fonte di reddito ed agiatezza, ma come miglioramento della qualità della vita in accordo con le risorse a propria disposizione.

Lo sviluppo di tecnologie rinnovabili rende perciò sempre più dipendenti dalla natura,

andando contro corrente con quanto si è fatto nell'ultimo secolo. Ciò non rappresenta uno svantaggio ma sicuramente uno sfruttamento più consapevole delle risorse a nostra disposizione permette di vivere allo stesso livello di benessere evitando inutili sprechi.

Non devono spaventare i bassi rendimenti ottenuti da fonti rinnovabili poiché in realtà si utilizza energia che altrimenti andrebbe sprecata, mentre le tecnologie basate sull'utilizzo di combustibili fossili anche quando realizzano rendimenti molto alti sprecano energia, non rendendola più disponibile per le generazioni future.

Particolare attenzione va data all'importanza di lavorare con le comunità locali e non per le comunità. La popolazione locale possiede già delle competenze di base che possono essere utili in fase di progettazione e realizzazione dell'intervento, rendendola consapevole delle potenzialità e dei problemi riguardanti i nuovi mezzi a disposizione. Questo obiettivo può essere raggiunto mediante la creazione di scuole dove viene insegnato l'utilizzo e la manutenzione della tecnologia installata.

Occorre far capire alla popolazione locale cosa succede in caso di mancanza della risorsa rinnovabile adottata, ad esempio in caso mancanza di vento o sole e prevedere soluzioni alternative, non scartando un generatore diesel alimentato ad olio vegetale.

Nel caso l'irrigazione sia ottenuta mediante una turbina eolica la comunità va formata ed informata sulla stagionalità della risorsa eolica e la sua ciclicità e che la mancanza di vento per qualche giorno non influisce negativamente sul raccolto.

Caratteristica fondamentale di una tecnologia appropriata è il suo basso livello tecnologico oltre che la sua semplicità di funzionamento, di realizzazione e di manutenzione.

Molto dipende anche dalla politica che i PVS vogliono adottare riguardo lo sviluppo energetico e lo sviluppo delle comunità rurali presenti sul territorio.

La politica è quindi un aspetto fondamentale e si può mirare al conseguimento di obiettivi sostenibili e concreti dove esiste un governo nazionale e locale disposto e seriamente intenzionato all'attuazione di programmi di sviluppo. La presenza di conflitti anche locali indubbiamente sfavorisce lo sviluppo energetico come sfavorisce lo sviluppo in generale della popolazione.

Ultimo aspetto ma non meno importante è rappresentato dalla barriera linguistica che intercorre tra operatori occidentali e popolazione locale. Buona parte delle persone facenti parte delle comunità servite possono essere analfabete o comunque avere un livello di istruzione basilare ed andando ad usare una terminologia complessa essi non capiscono ciò di cui si sta parlando. Nel caso di analfabeti la situazione è ancora più delicata in quanto i manuali di istruzione risultano per loro totalmente incomprensibili. Occorre quindi creare

apposite istruzioni tramite l'ausilio di disegni chiari che non danno adito ad interpretazioni errate.

In ultima analisi l'introduzione di una tecnologia appropriata deve essere pianificata e gestita con la collaborazione delle comunità locali, installando ciò che realmente serve e tenendo conto che le popolazioni locali mirano al miglioramento delle condizioni di vita basilari e non alla ricerca di profitto.

6.4 La scelta del micro-eolico.

La scelta del micro-eolico è stata fatta poiché risponde a tutti i requisiti fondamentali che una tecnologia appropriata deve avere in quanto:

- genera occupazione;
- viene compresa dall'utenza aumentandone le conoscenze tecniche;
- può essere facilmente riparabile e replicabile con pochi mezzi a disposizione in realtà arretrate;
- riduce l'impatto ambientale andando a sostituirsi all'utilizzo di generatori diesel.

Inoltre tutti gli obiettivi di sostenibilità vengono rispettati

Tra tutte le fonti di energia rinnovabile sopraelencate l'eolico è la tecnologia che può avere uno sviluppo notevole in termini di installazioni ed energia prodotta. A differenza del fotovoltaico, che attualmente richiede la presenza di celle in silicio prodotte prevalentemente in U.S.A. o in Giappone, l'eolico consente una realizzazione completa con materiale presente in loco. Inoltre la fonte vento non è stata ancora adeguatamente sfruttata nei PVS, preferendo l'utilizzo di biomasse e fotovoltaico. La scelta si è quindi orientata sul micro-eolico in quanto evita una serie di problematiche tecniche ed ambientali che sono intrinseche nel grande e medio eolico quali il rumore, l'impatto visivo, l'elevato grado tecnologico con la conseguente difficoltà di realizzazione, manutenzione e gestione di una turbina di elevata produzione e dimensione.

La scelta è condizionata, oltre che da considerazioni di natura tecnica, anche da analisi riguardo l'impatto sociale che un'innovazione tecnologica, per forza di cose, crea in un contesto arretrato. Una grande turbina con conseguente elevata produzione di energia sarebbe stata in grado effettivamente di sopperire al consumo energetico di molti villaggi contemporaneamente, ma a che costo?

Tale tecnologia non sarebbe stata sicuramente appresa e capita, col rischio di non essere una vera fonte di sviluppo, ma solo una grossa macchina che produce corrente elettrica in un

modo sconosciuto.

Il micro-eolico è indubbiamente più semplice da capire, poiché più “a portata di mano” rispetto ad un'installazione di grandi dimensioni. Oltretutto rappresenta una tecnologia appropriata poiché economicamente non produce squilibri non necessitando di grossi investimenti da parte della popolazione locale; la produzione di energia elettrica o meccanica ricavata con il micro-eolico copre ampiamente il fabbisogno di più famiglie, non generando direttamente un reddito ma incrementando il benessere delle comunità nel quale si va ad inserire. La presenza di piccole turbine vuole inserirsi in un contesto nel quale la presenza di una rete elettrica rappresenta ancora un traguardo troppo lontano; con l'installazione di una turbina micro-eolica, ovviamente dove esiste una reale presenza di vento, si offre la possibilità a comunità isolate di servirsi dell'elettricità.

Il micro-eolico è anche facilmente accoppiabile con altre tecnologie appropriate per la produzione di energia come il fotovoltaico oppure un generatore elettrico a motore alimentato con biocarburante.

7 PRINCIPI FISICI DI FUNZIONAMENTO DI UNA TURBINA EOLICA.

7.1 Origine del fenomeno ventoso.

Una turbina eolica è costruita per estrarre energia dal vento.

In questo capitolo andremo ad analizzare quali sono le forze ed i limiti fisici intrinseci alla risorsa eolica.

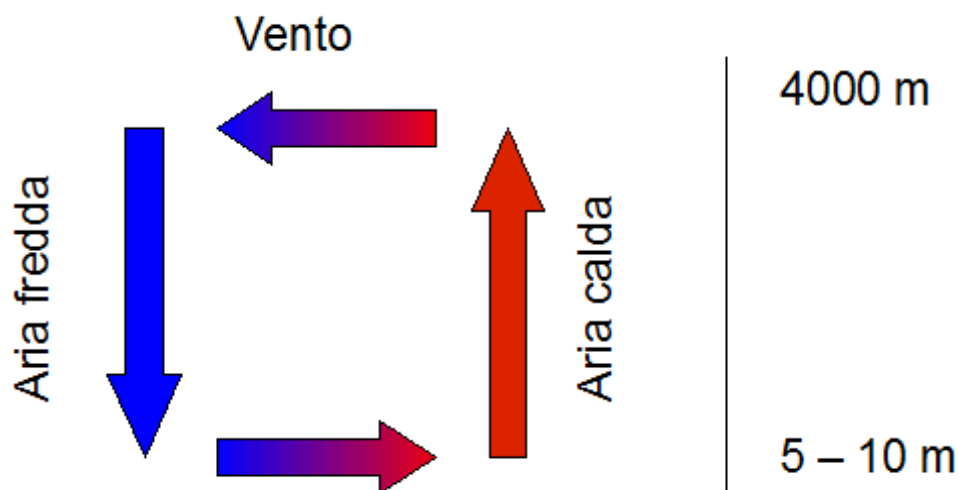
L'energia eolica è una fonte di energia rinnovabile strettamente legata all'energia solare.

Il Sole con le sue radiazioni riscalda la Terra, ma a causa dell'asse terrestre inclinato, non tutte le radiazioni prodotte dal Sole raggiungeranno il nostro pianeta in maniera uniforme. Ci saranno quindi zone più irraggiate di altre.

L'irraggiamento solare riscalda la superficie terrestre, di conseguenza esistono zone più calde che sono serbatoi di aria calda, e zone più fredde nel nostro pianeta che fungono da serbatoi di aria fredda.

L'aria calda è meno densa dell'aria fredda e tenderà a salire lasciando libero il suo posto a masse di aria fredda, più densa, che tenderà a muoversi verso il basso.

Si generano così sulla crosta terrestre dei moti convettivi globali che dai poli si spostano verso l'equatore.

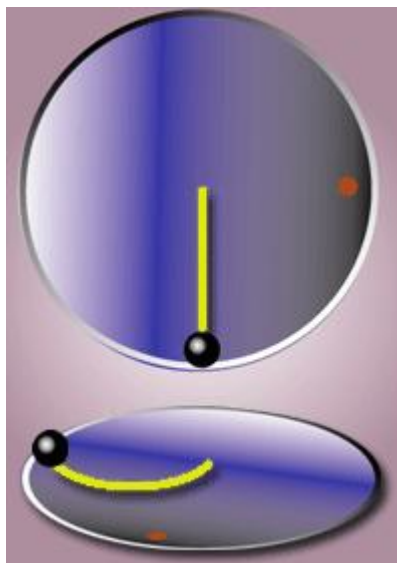


11. Rappresentazione schematica della formazione dei venti.

I moti a livello globale sono influenzati dalla *forza di Coriolis*.

La forza di Coriolis è una forza apparente dovuta alla rotazione della Terra attorno a suo asse.

Le masse d'aria in movimento non possiedono sufficiente attrito con la Terra per poter essere solidali con essa durante la rotazione. Di conseguenza i venti che normalmente scorrerebbero dai poli all'equatore vengono deviati verso ovest dalla rotazione terrestre dando origine ai venti costanti equatoriali, gli alisei.



12. Effetto della Forza di Coriolis (fonte wikipedia.com).

Come si può notare il corpo in nero si muove verso l'esterno del disco di moto rettilineo uniforme nel suo sistema di riferimento, ma se cambiamo punto di vista e restiamo solidali al disco il corpo assumerà una traiettoria curvilinea.

Si chiama quindi “forza apparente” in quanto è dipendente solo dal sistema di riferimento adottato dall'osservatore, e non esistono forze esterne che influenzano il movimento del corpo nero.

Se associamo al corpo nero le masse d'aria in movimento dai poli all'equatore, e al disco associamo la Terra e la sua rotazione abbiamo un'idea di quello che succede.

Oltre ad un'influenza globale le masse d'aria risentono anche di un'influenza regionale e locale dovuta alla presenza di grandi masse d'acqua. Sono noti a tutti gli effetti della *brezza di mare* e della *brezza di Terra* che si manifestano ciclicamente durante il giorno nelle zone costiere.

Anche in questo caso il principale attore è il Sole.

In zone costiere il vento si forma grazie alla differente inerzia termica delle masse d'acqua e della terra ferma. Di giorno l'acqua si riscalda molto più facilmente della costa e rilascia il calore acquisito durante il di molto prima rispetto alla terraferma. Si vengono a generare quindi differenze di pressione del tutto simili a quelle sopracitate, che permettono l'instaurarsi di fenomeni ventosi.

Durante la fase diurna si assisterà alla brezza di mare, che spira dal mare alla costa, mentre

durante la fase notturna avrà luogo la brezza di terra, che spira dalla costa al mare.

Il vento, essendo una massa d'aria in movimento, possiede una propria energia cinetica:

$$1 \quad E_c = \frac{m v^2}{2} [J]$$

dove:

m massa d'aria in movimento (kg)

v velocità del vento (m/s)

Se andiamo a valutare l'energia del vento in un'unità di tempo possiamo facilmente ricavare la potenza propria della massa d'aria considerata:

$$2 \quad P = \frac{m v^2}{2t} [W]$$

Dalla (2) possiamo individuare la portata massica di aria del vento:

$$3 \quad m/t = \dot{m}$$

$$4 \quad \dot{m} = \rho A v \left[\frac{kg}{s} \right]$$

dove:

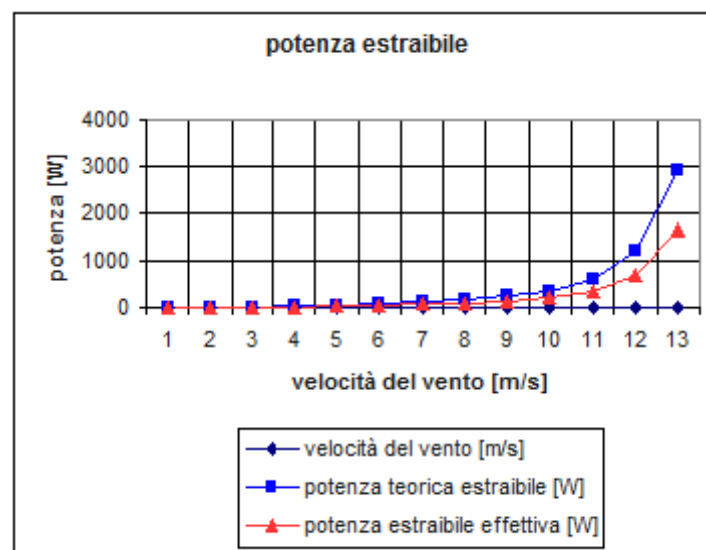
ρ densità dell'aria (kg/m³)

A area spazzata dal vento (m²)

v velocità del vento (m/s)

Sostituendo nella 2) la 4) otterremo:

$$5 \quad P = \frac{(\rho A v) v^2}{2} = \frac{1}{2} \rho A v^3 [W]$$



13. Potenza estraibile teorica ed effettiva.

Si può notare come a piccole differenze di velocità corrispondono notevoli aumenti di potenza della massa ventosa, con un andamento cubico.

La potenza del vento dipende anche dalla densità dell'aria, un parametro che può essere influenzato a sua volta da temperatura, pressione e quota del sito interessato.

Data l'impossibilità di stabilire delle leggi precise che regolino l'andamento delle sue caratteristiche, per semplificare le operazioni di calcolo si è reso necessario introdurre un modello statistico comune sulle caratteristiche dell'aria,

Si ricorre così all'*aria tipo* alla quota di riferimento, pari al livello del mare:

Grandezza fisica	Nomenclatura	Valore	Unità di misura
<i>temperatura</i>	T_0	288	°K
<i>pressione</i>	p_0	101325	Pa
<i>densità</i>	ρ_0	1,225	kg/m ³

1 *Aria tipo*

In via empirica sono state ricavate formule per descrivere la variazione delle tre grandezze fisiche prese in considerazione al variare della quota z espressa in metri:

$$6 \quad T_z = T_0 - 0,0065 z [^{\circ} K]$$

$$7 \quad p_z = p_0 (1 - 0,000026 z)^{5,256} \left[\frac{kg}{m^2} \right]$$

$$8 \quad \rho_z = \rho_0 (1 - 0,000026 z)^{4,256} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

quindi all'aumentare della quota le tre grandezze diminuiscono.

Ricordando la legge dei gas:

$$9 \quad \rho = \frac{p}{RT} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

si nota come la densità è influenzata da temperatura e pressione oltre che dalla quota.

In ultima analisi la discriminante principe per il calcolo della potenza eolica è la velocità del vento ma non si può prescindere dalle tre grandezze fisiche introdotte.

7.2 Potenza estraibile e limite di Betz.

Partendo dalla 2) si può ragionare sulla quantità di moto della massa d'aria.

Dalla variazione della quantità di moto del vento a monte e a valle dell'aerogeneratore otteniamo la potenza effettivamente estraibile dal vento:

$$P = \frac{m}{2t} (v_i^2 - v_0^2) [W]$$

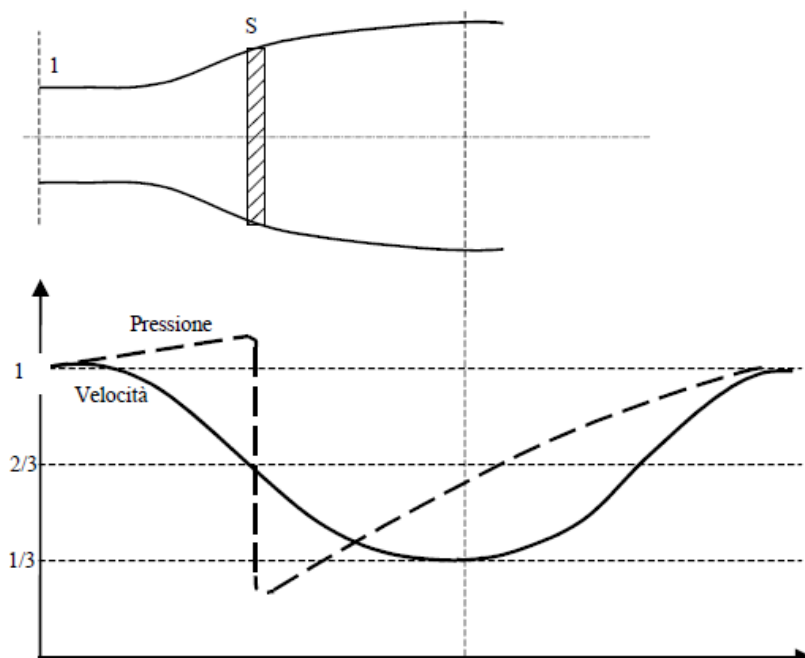
dove:

v_i velocità del vento in entrata al rotore (m/s)

v_0 velocità del vento in uscita dal rotore (m/s)

Teoricamente la potenza massima estraibile si ha quando la velocità in uscita dal rotore è pari a zero, ma la velocità in uscita non potrà mai essere nulla poiché si avrebbe l'arresto della corrente fluida, oppure significherebbe andare contro al principio di conservazione della massa.

Esiste un limite minimo per la velocità in uscita dal rotore e conseguentemente un limite massimo di potenza estraibile dalla corrente ventosa. Il fisico Alfred Betz ha teorizzato questo limite partendo dal teorema di Bernoulli, secondo il quale la somma dell'energia cinetica, dell'energia piezometrica e dell'energia data dalla pressione si mantengono costanti.



14. Andamento della velocità e della pressione lungo il tubo di flusso.¹

¹ Figura 14. D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 24*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

La quota di riferimento del nostro tubo di flusso non cambia quindi le uniche variabili rimangono la pressione e l'energia cinetica.

Quando la corrente di fluido, avente una sua energia cinetica data dalla velocità v_0 e una pressione p_0 , impatta contro le pale di un rotore eolico subisce un aumento di pressione. Di contro la velocità dovrà diminuire e in questo momento si avrà il passaggio di energia dal vento alla turbina eolica.

La velocità del vento a valle del disco intercettato dal rotore non potrà mai essere nulla come già detto in precedenza, ma subisce un decremento notevole dell'ordine di $2/3$ del suo valore.

Introduciamo di conseguenza il *coefficiente di potenza* C_p in funzione del rapporto tra la velocità in uscita al rotore e quella in entrata:

$$11 \quad C_p\left(\frac{v_0}{v_i}=\frac{1}{3}\right)=0,593$$

La massima potenza estraibile sarà:

$$12 \quad P_e = C_p P = 0,593 P [W]$$

Il coefficiente C_p trovato da Betz non tiene però conto delle turbolenze che lo stesso rotore trasferisce al flusso d'aria. Si va perciò ad introdurre un secondo coefficiente, il *coefficiente di potenza rotorico* C_{pr} , ovvero il rapporto tra la potenza meccanica del rotore e la potenza messa a disposizione dal vento.

Il C_{pr} dipende da:

- attrito dell'aria con le pale;
- fenomeni vorticosi generati dal movimento delle pale;
- numero non infinito di pale;
- velocità del vento.

Il coefficiente di potenza rotorico sarà sempre inferiore al limite di Betz.

$$13 \quad P_e = C_{pr} P = C_{pr} \frac{1}{2} \rho A v^3 [W]$$

In particolare si usa esprimere il C_{pr} in funzione del rapporto cinetico fondamentale λ definito come:

$$14 \quad \lambda = \frac{u_{apice}}{v} = \frac{\omega r}{v}$$

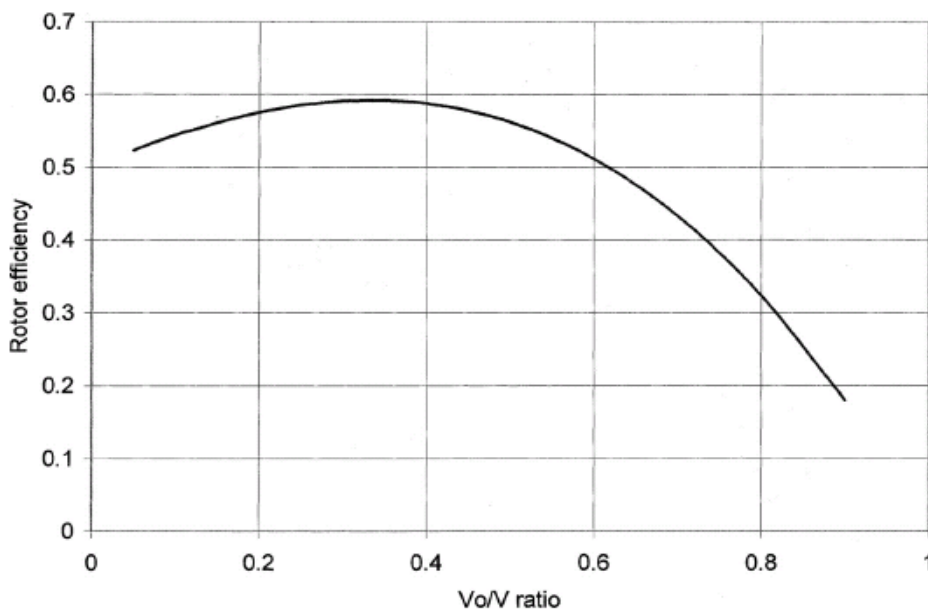
dove:

u_{apice} velocità all'apice della pala del rotore;

v velocità del vento.

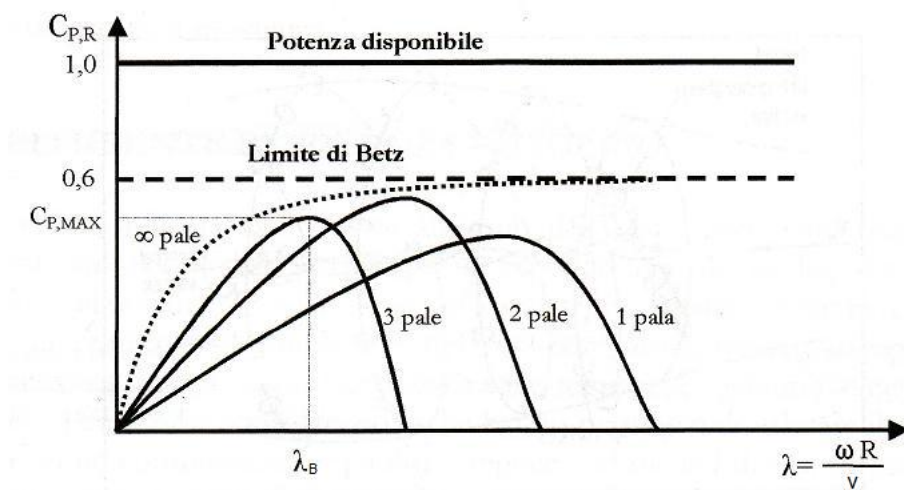
Nella terminologia anglosassone λ viene chiamato *Tip Speed Ratio*.

Come si può notare il rapporto è adimensionale. Una seconda osservazione che si può fare è sul valore di questo rapporto: più è grande più rapidamente gira l'elica, viceversa quando l'elica gira lentamente.



15. Efficienza rotorica in funzione della Tip Speed Ratio (HAWT)².

Per valori di λ bassi si avranno dissipazioni di energia molto contenute ma le pale riusciranno ad intercettare solo una piccola parte dell'energia cinetica messa a disposizione dal vento. Viceversa per alti valori di λ il rotore sarà in grado di intercettare una grossa parte dell'energia posseduta dal vento ma ne cederà di più per via delle elevate velocità di rotazione.



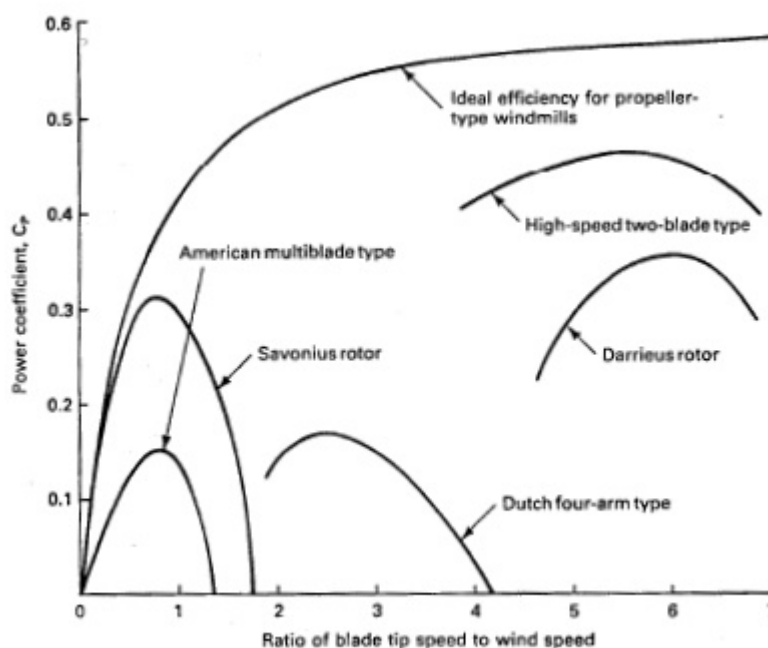
16. Coefficiente di potenza rotorico in funzione della Tip Speed Ratio al variare del numero di pale (HAWT)³.

² Figura 15.M. Patel (2006) *Wind and solar power systems: desing, analysis and operation*, pag 28,

³ Figura 16. D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 32*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

Dal grafico precedente si può notare che coefficiente di potenza rotorico non sarà mai superiore al limite di Betz, ma si può avvicinare al C_p teorico aumentando il numero delle pale nel caso di rotore eolico ad asse orizzontale.

Nel grafico successivo si capisce come C_p e λ siano influenzati dalla geometria costruttiva del rotore eolico.



17. Coefficienti di potenza delle macchine eoliche in funzione della loro Tip Speed Ratio.⁴

Da questo grafico è evidente che ogni tipologia di rotori sia ottimizzata per lavorare ad un dato valore di λ . Ciò vuol dire che esiste un unico valore di velocità del vento che massimizza C_p . Sono stati studiati e commercializzati anche rotori a velocità variabile che ampliano il range di ottimizzazione del vento, cioè all'aumentare della velocità del vento aumentano la velocità di rotazione. Questo effetto si può ottenere mediante la variazione dell'angolo di attacco nel caso di rotori a portanza.

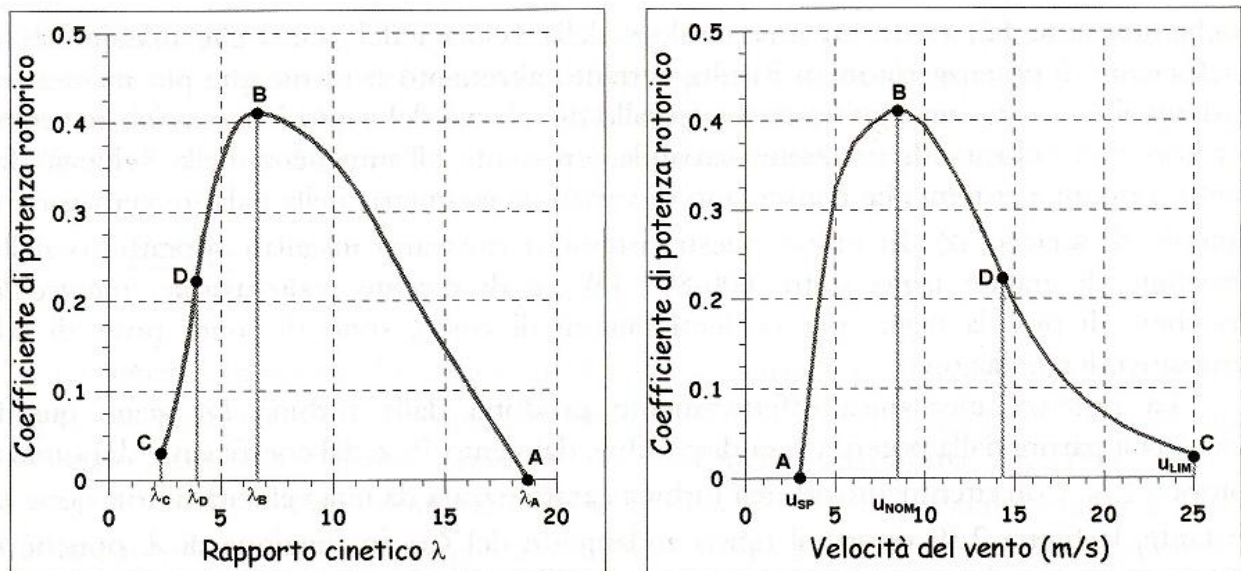
Si possono individuare tre valori di λ , che corrispondono ad altrettanti valori di velocità del vento, caratteristici delle turbine eoliche:

- $\lambda_{\max}$; (punto A) oltre questo punto il coefficiente di potenza rotorico è negativo. A questo punto corrisponde la velocità del vento minima, velocità di spunto u_{sp} o di *cut-in*, che è la velocità a cui il rotore eolico parte. Generalmente si aggira intorno ai 3-5 m/s.

4 Figura 17.M. Patel (2006) *Wind and solar power systems: design, analysis and operation*, pag 29.

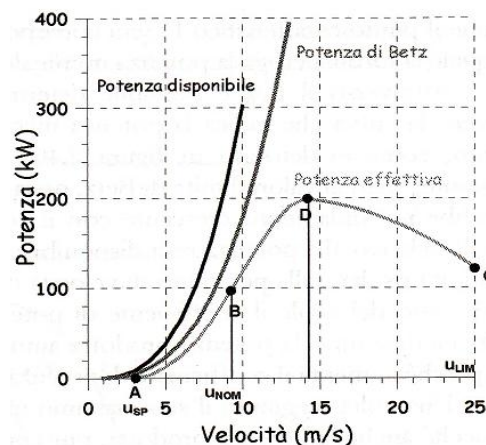
- λ_b ; (punto B) in questo punto il C_p raggiunge il suo massimo valore.
- λ_{min} ; (punto D) è in corrispondenza della velocità di *cut-off*, cioè la velocità alla quale la turbina ha raggiunto i suoi limiti strutturali e deve essere fermata.

Il punto D rappresenta il valore di velocità nominale u_{nom} del rotore, valore per il quale l'aerogeneratore eroga la sua potenza nominale.



18. Variazione del coefficiente di potenza rotorico in funzione di λ e u .⁵

Grazie al C_{pr} è possibile ottenere la curva di potenza dell'aerogeneratore, cioè la curva che indica la potenza meccanica prodotta dalla turbina in funzione della velocità del vento.



19. Potenza meccanica prodotta in funzione di u per turbina a giri costanti.⁶

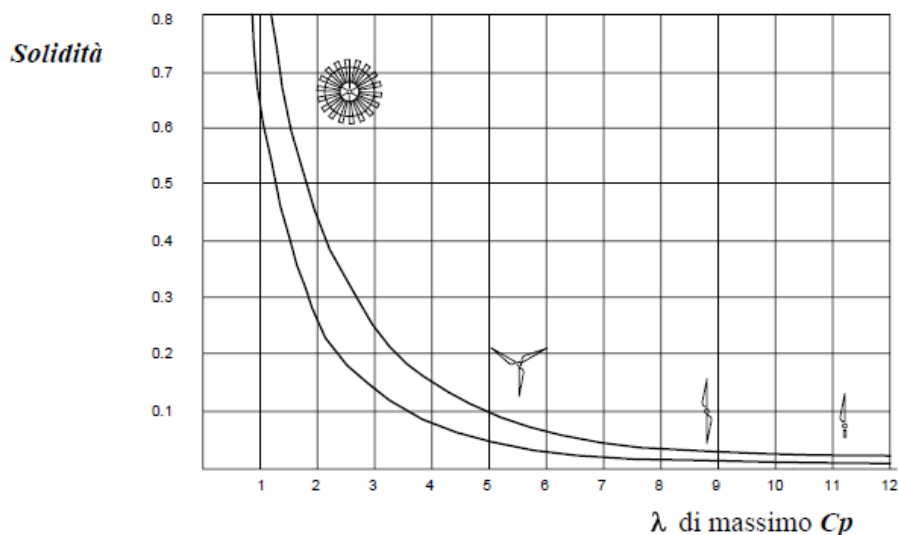
⁵ Figura 18.D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 34*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

⁶ Figura 19.D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 34*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

La potenza prodotta sarà nulla prima del punto A, in corrispondenza della velocità di spunto, così come oltrepassato il punto C, oltre il quale il rotore viene fermato.

Nel punto D si avrà la potenza massima prodotta, in corrispondenza del valore di velocità nominale, che è caratteristico per ogni macchina.

Un altro parametro molto importante è il rapporto di solidità definito come il rapporto tra l'area effettivamente occupata dalle pale e l'area spazzata dal rotore.



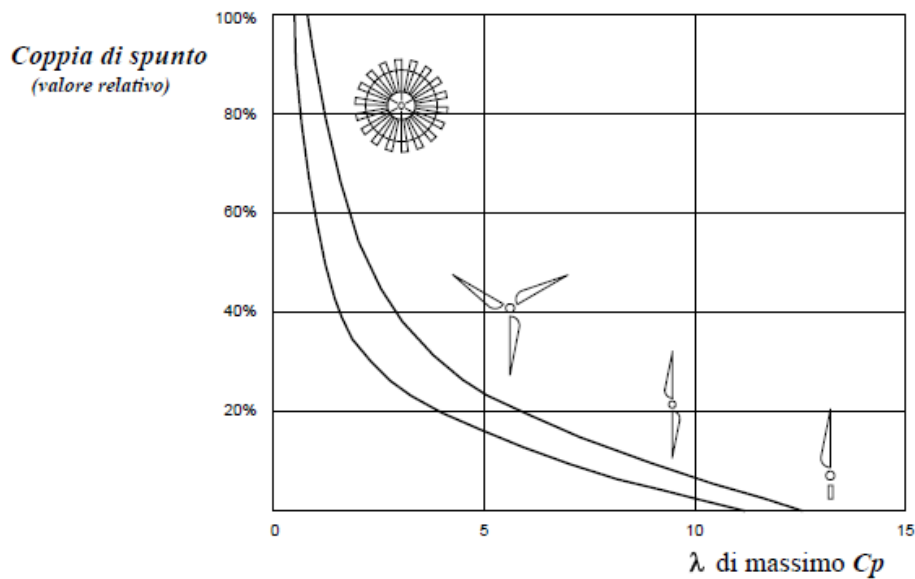
20. Relazione tra solidità e λ ottimale per aerogeneratori ad asse orizzontale.

All'aumentare del coefficiente di solidità aumentano le turbolenze, che sono provocate dall'ingombro elevato delle pale, e gli effetti dissipativi, facendo così diminuire il C_p .

I rotori tradizionali ad alta solidità riescono a fornire la massima potenza anche a velocità di rotazione basse; in questo modo il C_p risulta massimo a bassi valori di λ permettendo l'accoppiamento diretto con macchine operatrici.

Un ultimo parametro da tenere in considerazione è dato dalla coppia di spunto.

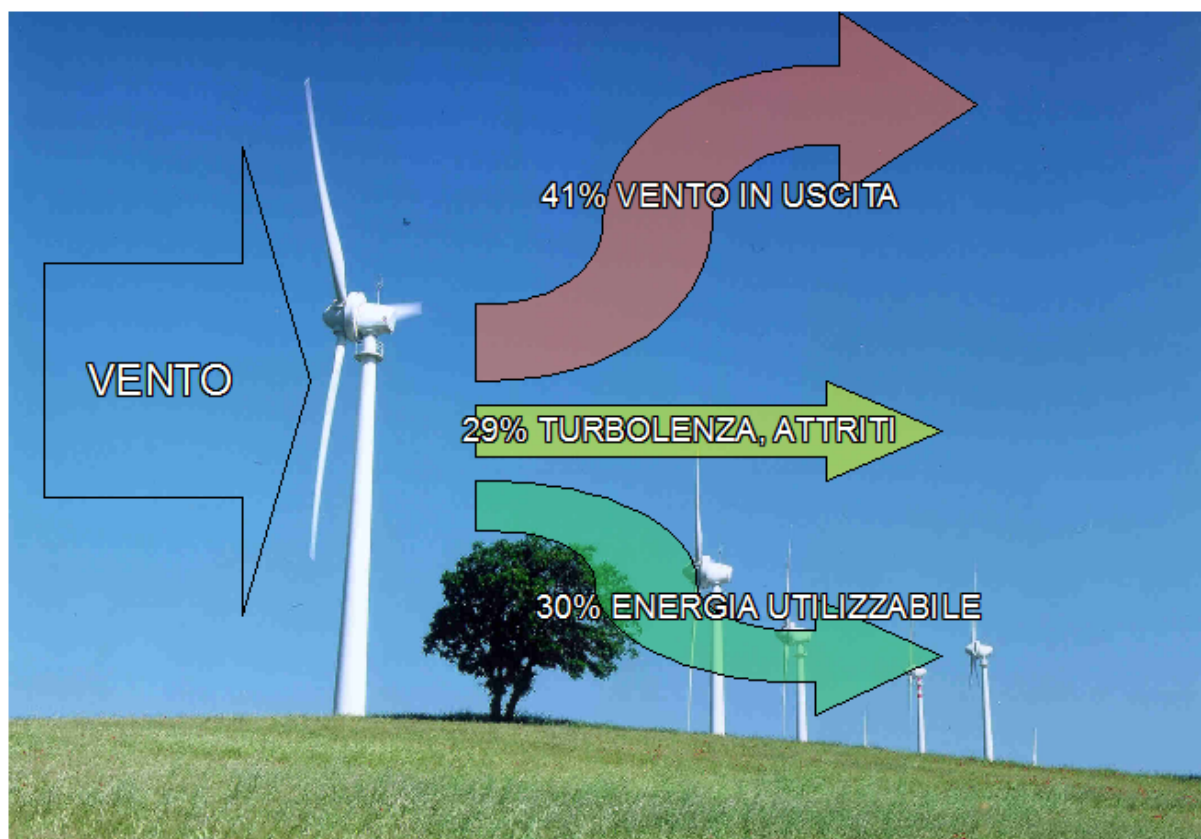
Quanto maggiore è la coppia di spunto quanto maggiore è la capacità del rotore di partire e di girare. Gli aerogeneratori con bassi valori di *Tip Speed Ratio* hanno la caratteristica di avere una coppia di spunto molto alta, azionando l'utilizzatore a loro connesso anche in campi di velocità del molto bassi. Dal grafico si può osservare l'alta coppia di spunto dei rotori multipala e la bassa coppia di spunto degli aerogeneratori aerodinamici.



21. Valore della coppia di spunto in funzione di λ .

Un'ulteriore analisi riguarda il bilancio energetico generale di una turbina eolica, riassumendo i concetti ed i limiti esposti precedentemente.

La massa di aria in movimento possiede come già detto una propria energia cinetica.



22. Bilancio energetico di una turbina eolica.

Il limite di Betz è un limite intrinseco allo sfruttamento della risorsa eolica ed impone una

prima perdita di energia posseduta dalla corrente ventosa del 41%. Questo parametro rimane fisso per qualsiasi tipo di turbina eolica adottata e non è possibile intervenire in alcun modo per poterlo modificare.

La turbina eolica stessa possiede un proprio rendimento interno con una conseguente perdita di energia della massa di aria che viene stimata nel 29%. La perdita varia a seconda dell'aerogeneratore utilizzato ma generalmente le perdite principali sono causate da:

- turbolenza attorno alle pale della turbina;
- attrito delle componenti meccaniche;
- rendimento del sistema di trasmissione;
- rendimento del sistema di conversione dell'energia;
- guasti.

Questa perdita di energia può essere ridotta andando ad intervenire in fase di progettazione delle componenti, scegliendo accoppiamenti appropriati che non condizionino il funzionamento della turbina. È possibile intervenire anche in fase di montaggio della macchina eolica, prestando attenzione alla corretta installazione di tutte le componenti di cui è formata; piccoli difetti di montaggio si possono tradurre in attriti di grande entità con conseguente perdita di efficienza oltre che di riduzione del tempo di vita della turbina.

I guasti provocati da un montaggio non rigoroso, oltre che quelli provocati da agenti esterni come volati che impattano sulla turbina o condizioni meteorologiche sfavorevoli provocano un degrado accelerato della struttura e delle parti di cui è composta. Occorre quindi una manutenzione regolare e scrupolosa per evitare danni e perdite di rendimento.

Solo il 30% dell'energia posseduta dal vento diventa quindi potenzialmente disponibile per essere sfruttata sotto forma di energia elettrica o meccanica.

8 SCELTA DEL SITO IN FUNZIONE DELLA RISORSA EOLICA.

Dov'è conveniente installare una turbina eolica?

Questa domanda può sembrare in apparenza banale ma la caratterizzazione del sito è di fondamentale importanza, poiché installare un aerogeneratore nel posto sbagliato vorrebbe dire aver speso malissimo le risorse finanziarie a disposizione.

Una corretta caratterizzazione del sito è di fondamentale importanza anche nella scelta della tecnologia da adottare. Infatti per venti turbolenti e di scarsa intensità è molto poco conveniente usare aerogeneratori ad asse orizzontale di grossa taglia, ma ci si orienta su macchine ad asse verticale di medie o piccole dimensioni.

Naturalmente la scelta dipenderà anche dal tipo di utenza prevista.

Nel nostro caso non terremo conto delle infrastrutture come strade, ponti, etc., necessari per l'installazione di *fattorie eoliche*, e quindi mulini di notevoli dimensioni nell'ordine dei MW.

In prima battuta sono due le analisi che vanno compiute per una corretta caratterizzazione del sito e di conseguenza per una scelta efficace di sito e tecnologia eolica:

- **analisi morfologica del terreno;**
- **analisi anemometrica.**

8.1 Analisi morfologica del terreno.

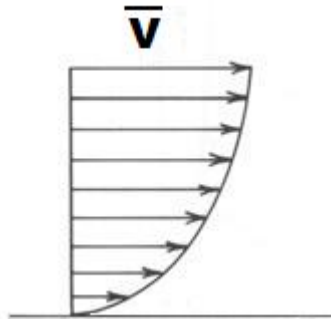
L'analisi morfologica del terreno è di fondamentale importanza per una prima scelta dei siti potenzialmente produttivi.

Una buona osservazione dell'orografia del sito può servire come base da cui partire per la seconda fase di caratterizzazione del sito che è l'analisi anemometrica. Inoltre le testimonianze orali della popolazione locale sono un'ottima fonte di notizie per quanto riguarda l'individuazione di potenziali siti.

La velocità del vento è influenzata dall'attrito tra il terreno e la massa d'aria in movimento. La spiegazione è molto semplice ed intuibile senza dover ricorrere alla formula di Reynolds (pag. 69)

La velocità del fluido tende a decrescere man mano che ci si avvicina alle pareti entro il quale scorre, ed aumenta allontanandosi dalle pareti.

Nel nostro caso la parete è costituita dal terreno, di conseguenza le velocità avranno un andamento parabolico come è rappresentato nella figura seguente.



23. Distribuzione della velocità del vento al variare della quota.

A livello del suolo la velocità è nulla e ciò è dovuto alla *rugosità* del terreno.

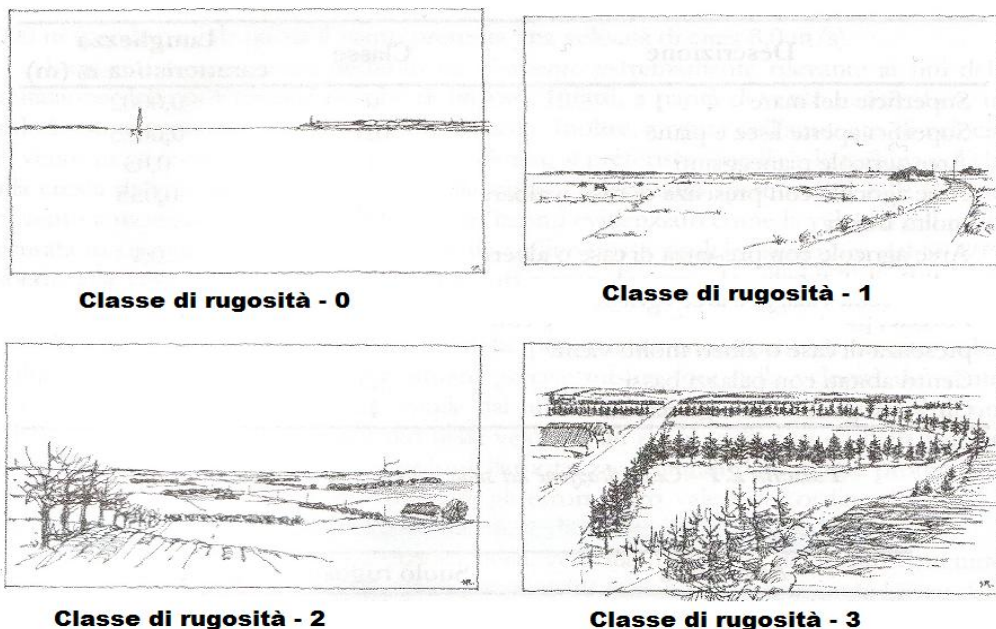
La rugosità è la capacità di una superficie di frenare il fluido che scorre su di essa.

Questo parametro fondamentale si può esprimere qualitativamente e quantitativamente tramite il termine z_0 espresso in m.

Esiste un'equazione, ricavata in maniera empirica, che mette in relazione quota z , intensità di turbolenza I e rugosità z_0 :

$$I = \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]^{-1}$$

Ogni superficie ha la sua rugosità caratteristica che dipende appunto dalla conformazione del terreno:



24. Classi di rugosità in funzione della morfologia.⁷

⁷ Figura 24.D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 11*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

Esistono anche tabelle che riassumono le classi di rugosità in funzione di caratteristiche descrittive del sito:

Classi di rugosità e lunghezza caratteristica			
Classe di rugosità	Lunghezza caratteristica z_0 (m)	Indice energetico percentuale	Tipologia di suolo
0	0.0002	100	Superficie dell'acqua
0.5	0.0024	73	Terreno completamente aperto con superficie liscia. Aeroporti, prati, etc.
1	0.03	52	Terreno agricolo aperto senza recinzioni e siepi e edifici molto diradati. Solo colline con pendii dolci.
1.5	0.055	45	Terreno agricolo con qualche casa e siepi alte al Massimo 8 metri con una distanza approssimativa di 1250 metri.
2	0.1	39	Terreno agricolo con qualche casa e siepi alte al Massimo 8 metri con una distanza approssimativa di 500 metri.
2.5	0.2	31	Terreno agricolo con tante case, cespugli, piante e siepi alte al Massimo 8 metri con una distanza approssimativa di 250 metri.
3	0.4	24	Paesi, villaggi, piccolo centri urbani, terreni agricoli con tanti o alti alberi e siepi, boschi e terreno ruvido e diseguale.
3.5	0.8	18	Città grandi con edifici alti
4	1.6	13	Città molto grandi con edifici alti e grattacieli.

2

Classi di rugosità.

Come si può notare più aumentano gli ostacoli presenti sulla superficie più la rugosità aumenta di classe. Di conseguenza il vento perde punti percentuali di energia arrivando a perderne quasi il 90% in caso di città grandi come Milano o Roma analizzando zone estese, mentre mantiene inalterata la sua quota di energia quando soffia su superfici perfettamente lisce come l'acqua. È per questo che, ad esempio, in Danimarca si stanno sviluppando impianti eolici off-shore.

Talvolta sono presenti anche in città installazioni eoliche che sfruttano i fenomeni di ventosità dovuti all'effetto Canyon Urbano. Questo effetto si presenta in corrispondenza di strade strette circondate da palazzi molto alti. Per via di differenze di temperatura si instaura un movimento

della massa d'aria che genera vento. La presenza di palazzi impedisce la dispersione della massa d'aria in movimento che accresce la sua velocità nel passaggio attraverso vie e viali in città. L'energia della massa ventosa viene catturata e convertita in energia elettrica per alimentare lampioni o piccole utenze.

Inoltre è possibile sfruttare il vento presente sulla sommità di palazzi di altezza elevata. La velocità del vento aumenta la sua intensità al crescere della quota. Si introduce quindi un parametro molto importante derivato dalla rugosità, il *wind shear exponent* (α), o profilo verticale di velocità, che indica come la velocità del vento varia con l'aumentare della quota:

$$16 \quad v_{(z)} = v_1 \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_1}{z_0}}$$

dove:

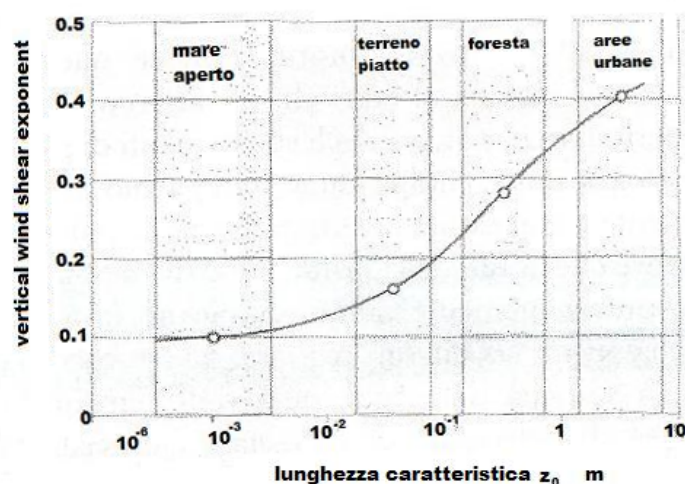
- v velocità del vento alla quota z ;
- v_1 velocità del vento misurata alla quota z_1 ,
- z_0 rugosità
- z quota alla quale vogliamo conoscere la velocità

E esiste una seconda formula con la quale possiamo trovare la velocità alla quota z :

$$17 \quad v_{(z)} = v_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha$$

dove:

- α wind shear exponent.



25. Variazione di α in funzione della rugosità.⁸

⁸ Figura 25.D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 11*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.

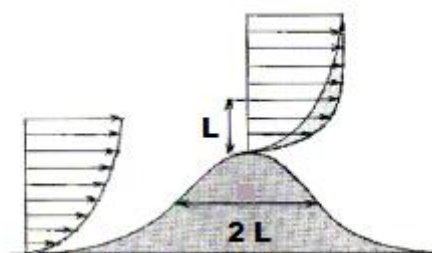
Il valore di α varia appunto con le caratteristiche del suolo ed in funzione della lunghezza caratteristica, come si può evincere dal grafico precedente.

Bisogna osservare però che i dati della figura sopra valgono in condizioni di stabilità atmosferica.

La presenza o meno di pendii, valli, catene montuose può far variare di molto l'intensità del vento.

Tramite un esperimento ad Askervein nel 1982 e nel 1983 è stato dimostrato che l'intensità del vento aumenta sulla cima dei rilievi montuosi. Questo esperimento è stato condotto sull'isola di South Uist, nell'arcipelago delle Isole Ebridi, a nord della Scozia, sulla collina di Askervein.

Sul profilo della collina sono stati piazzati, a distanza regolare di 10 m in altezza, dei rilevatori anemometrici e l'analisi dei dati ha dimostrato un aumento notevole della velocità del vento sulla cima della collina. Prendendo come riferimento sempre la cima della collina l'aumento più elevato lo si ha per quote medie, intorno ai 10-15 m, mentre successivamente tende a ritornare ai valori di velocità che avrebbe in assenza dell'effetto del crinale.

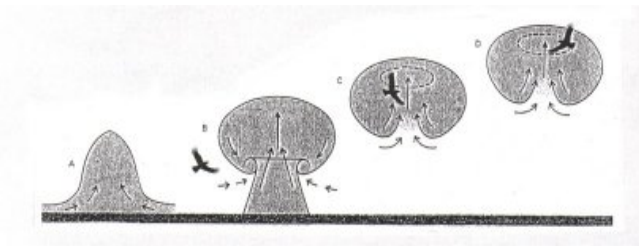


26. Influenza di un rilievo sulla velocità del vento.⁹

Lo stesso effetto sull'intensità del vento viene prodotto da qualsiasi ostacolo che esso sia una casa, un cancello, una collina.

Esistono anche indicatori biologici che possono aiutare l'osservatore nella prima scelta del sito. Questi indicatori possono essere il volo di particolari specie di volatili come la cicogna, o più in generale uccelli dalla medio grande apertura alare, che sfruttano le correnti ascensionali per salire di quota. È molto probabile che in zone dove ci siano frequenti correnti ascensionali ci sia anche una discreta intensità del vento.

⁹ Figura 26.D. Cocco, C. Palomba (2008) *Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 13*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica.



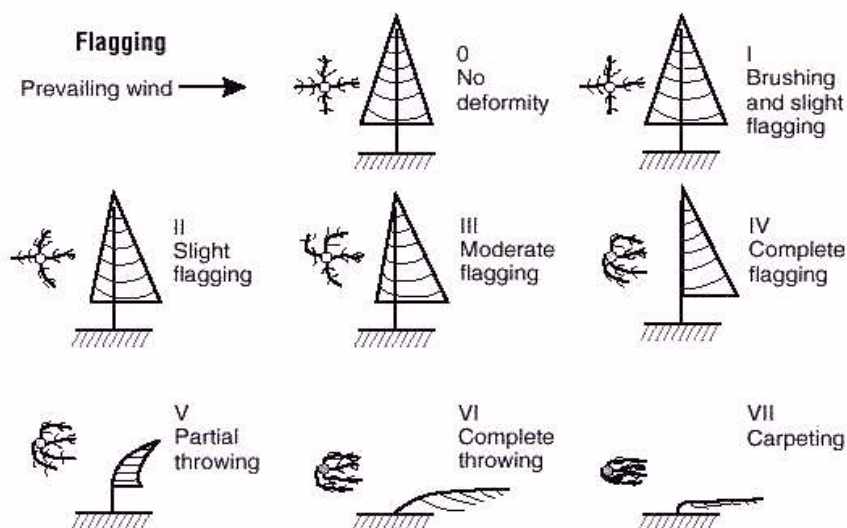
27. Formazione di correnti ascensionali.

Un secondo indicatore è l'inclinazione degli alberi di media-grande dimensione.

Un metodo decisamente empirico è stato ideato da Griggs – Putnam, che si basa sull'osservazione dell'inclinazione delle conifere.

Il vento costante fa sì che la pianta prenda una certa inclinazione e da questa inclinazione si può risalire alla velocità del vento e alla sua direzione prevalente.

Griggs-Putman hanno sintetizzato i loro studi con una tabella:



Griggs-Putnam Index of Deformity

Index	I	II	III	IV	V	VI	VII
Wind, mph	7-9	9-11	11-13	13-16	15-18	16-21	22+
Speed, m/s	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	10

28. Indice di deformazione delle conifere, Griggs – Putnam.

Dopo questi primi accorgimenti si può passare alla seconda fase di caratterizzazione vera e propria del sito.

8.2 Analisi anemometrica.

Per valutare dove è effettivamente conveniente posizionare una o più turbine eoliche è

indispensabile compiere uno studio anemometrico. Siccome si tratta di indagini statistiche uno studio anemometrico ha senso se effettuato in maniera continuativa nell'ordine di 3-5 anni, anche se dopo 18 mesi si possono avere dati coerenti e sufficientemente significativi.

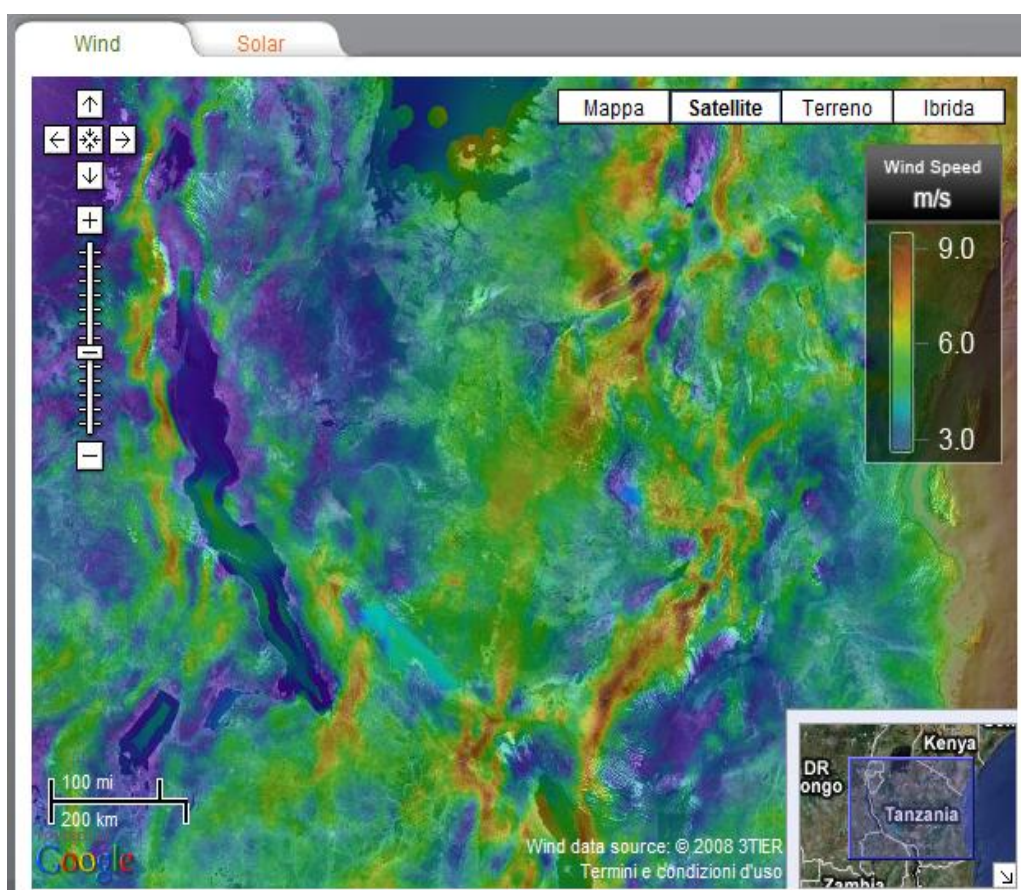
I due parametri principali da osservare sono:

- **intensità del vento;**
- **direzione del vento.**

Quando intensità e direzione restano costanti il vento si dice *teso*, se rimane costante in direzione ma varia continuamente in intensità si dice a *raffica*, infine quando questi due parametri variano in continuazione il vento si dice *turbinoso*.

8.2.1 Intensità del vento.

L'intensità del vento indica il valore della sua velocità che può essere espressa in metri al secondo m/s o in nodi. Un nodo è uguale ad un miglio all'ora. Per passare da m/s a nodi occorre moltiplicare per 1,86.



29. Mappa di ventosità della Tanzania a 50m di altezza (fonte:<http://firstlook.3tiergroup.com/>).

La velocità del vento è di fondamentale importanza per l'analisi delle potenzialità del sito, siccome la potenza resa è in funzione del cubo della velocità.

Un primo screening lo si può compiere cercando le mappe eoliche fornite dai servizi meteorologici nazionali o da siti specializzati. Un esempio è dato dalla figura 29.

Come si può notare è molto semplice fare una prima analisi della ventosità anche di zone molto estese come, in questo caso, il Tanzania. Dove il colore tende al rosso la zona è particolarmente ventosa (9 m/s corrispondono a 32,4 km/h) mentre più colori tendenti al blu indicano zone a più basso potenziale eolico.

La ventosità maggiore si ha in zone montuose, dove il Sole non riesce a riscaldare uniformemente i crinali delle montagne.

Una volta individuato il macrosito si scende nello specifico monitorando il vento tramite una campagna anemometrica.

Le apparecchiature che rilevano la velocità del vento sono gli anemometri che possono essere ad elica, a coppe di Robinson (i più comuni), fino ai moderni anemometri ad ultrasuoni o laser.

Generalmente si usano anemometri ad elica o a coppa, per via della loro semplicità costruttiva, della versatilità, della facilità di installazione e della loro resistenza nel tempo.



30. Anemometro a coppe (A); anemometro ad elica (B).

Il principio di funzionamento degli anemometri è molto semplice:

le eliche, o le coppe dell'anemometro, vengono messe in movimento dal vento fanno ruotare l'asse al quale sono fissate ed in base al numero di giri di quest'ultimo si può ricavare il valore di velocità del vento. La velocità di rotazione è direttamente proporzionale alla intensità del vento. L'elemento sensibile alla direzione è costituito da una banderuola che si orienta secondo la provenienza del vento. La velocità di rotazione del mulinello e la direzione sono trasformati in segnali elettrici e inviati, attraverso un cavo telefonico, al sistema di acquisizione ed elaborazione dati all'interno della stazione meteo, dove sono convertiti in forma digitale e presentati su indicatori. Si possono così graficare i dati oppure calcolare il valore medio, minimo e massimo per un dato periodo di tempo prestabilito. Generalmente si usa una velocità del vento mediata in intervalli di 5-10 minuti, ma dove l'acquisizione dei dati

risulta difficoltosa a causa della mancanza di linee telefoniche o altri sistemi di comunicazione si ricorre ad hardware per memorizzare i dati, e l'intervallo temporale può dilatarsi dai 30 minuti ad un'ora. Naturalmente l'anemometro va posizionato all'altezza alla quale si vuole posizionare la turbina eolica, ancora meglio se l'altezza corrisponde con quella del mozzo, anche se già a 2/3 dell'altezza prevista del mozzo ci da ottime indicazioni.

La misura approssimativa della forza del vento, come già visto in precedenza, può essere determinata osservando i fattori biologici, cioè gli effetti che esso produce sulle cose e gli oggetti che si trovano all'aperto. Da ciò ha origine la *scala Beaufort*, una misura pratica della velocità del vento, che prende il nome dal suo ideatore Francis Beaufort (1774-1857), contrammiraglio e idrografo inglese che individuò 12 gradi di intensità definiti dagli effetti del vento sul mare. Successivamente la scala Beaufort è stata aggiornata e ad oggi è la scala usata per classificare l'intensità dei venti.

Grado	Termine descrittivo	Classe	Intensità			Descrizione visiva
			[Nodi]	[m/sec]	[Km/h]	
0	Calma	Calma	<1	0÷0.2	<1	Il fumo sale verticalmente.
1	Bava di vento		1÷3	0.3÷1.5	1÷5	La direzione del vento è visibile dal movimento del fumo ma non dalla banderuola segnamento.
2	Brezza leggera	Debole	4÷6	1.6÷3.3	6÷11	Si avverte il vento sulla faccia; le foglie si agitano; banderuole ordinarie in movimento.
3	Brezza tesa		7÷10	3.4÷5.4	12÷19	Foglie e ramoscelli in movimento costante; le bandiere leggere iniziano a spiegarsi.
4	Vento moderato	Moderato	11÷16	5.5÷7.9	20÷28	Si sollevano polvere e pezzi di carta; rami degli alberi in movimento.
5	Vento teso		17÷21	8÷10.7	29÷38	Gli alberelli ondeggiano; si increspano le acque interne (laghi, stagni, ecc.).
6	Vento fresco	Forte	22÷27	10.8÷13.8	39÷49	Grossi rami in movimento; difficoltà nell'uso degli ombrelli.
7	Vento forte		28÷33	13.9÷17.1	50÷61	Interi alberi in movimento; camminando controvento si prova fastidio in faccia.
8	Burrasca	Molto forte	34÷40	17.2÷20.7	62÷74	Si spezzano i rami degli alberi; generale impedimento all'avanzamento.
9	Burrasca forte		41÷47	20.8÷24.4	75÷88	Si verificano leggeri danni alle costruzioni (si spostano piccoli oggetti e le tegole).
10	Tempesta	Tempesta	48÷55	24.5÷28.4	89÷102	Considerevoli danni alle abitazioni; sradicamento di alberi; onde molto alte in mare.
11	Tempesta violenta		56÷63	28.5÷32.6	103÷117	Danni ingenti su vasta scala.
12	Uragano		64 ed oltre	32.7 ed oltre	118 ed oltre	Danni ingentissimi in breve tempo su vasta scala.

Esistono dei parametri che caratterizzano sinteticamente il sito dal punto di vista anemometrico e tra di loro i più utilizzati sono:

- *Velocità media aritmetica* v , molto utile per una prima analisi del sito e per la comparazione con altri siti;
- *Velocità media cubica* v^3 , per un'immediata visione della potenza disponibile, siccome essa dipende dal cubo della velocità del vento;
- *Velocità massima* v_{max} , indispensabile per il corretto dimensionamento degli aerogeneratori;
- *Scarto quadratico medio* σ , deviazione standard della velocità del vento, è una funzione statistica che esprime il grado di regolarità dei dati a disposizione, in questi caso della fonte eolica;

$$18 \quad \sigma = \frac{1}{N_r} \int_0^{N_r} \sqrt{(v - v^o)^2} dt$$

dove:

N_r numero di rilevazioni;

v velocità del vento (m/s);

v^o media aritmetica della velocità del vento (m/s).

- *Intensità di turbolenza* I , già vista in precedenza ma che può essere anche data dal rapporto tra σ e v

$$19 \quad I = \frac{\sigma}{v}$$

L'intensità di turbolenza varia nell'ordine di 0,1 – 0,2 ed al diminuire della velocità media del vento cresce.

L'intensità di turbolenza è un dato fondamentale per il calcolo e per l'individuazione del sito. Difatti un'elevata turbolenza crea problemi al moltiplicatore di giri e alla meccanica della turbina in generale, perché creando vortici con un flusso del vento non costante l'aerogeneratore sarà sempre costretto ad “inseguire” il vento, cambiando continuamente numero di giri. Lavorando a numeri di Reynolds molto alti si hanno così problemi di stress e fatica sulla parte meccanica della turbina eolica, diminuendone notevolmente il tempo di vita. Il numero di Reynolds è un parametro usato in fluidodinamica per valutare il movimento di un fluido. Più è alto questo numero più il moto del fluido è turbolento, più è basso più il

movimento è laminare. Il numero di Reynolds verrà esplicitato nel paragrafo 9.1.1.

Intensità di turbolenza	Potenza	Tempo di vita della turbina
+	-	-
-	+	+

4

Tabella riassuntiva degli effetti della turbolenza.

8.2.2 Direzione del vento.

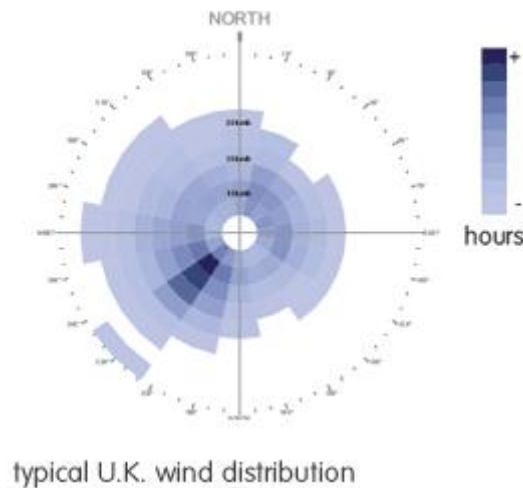
La direzione del vento è indicata tramite un angolo, definito *azimut*, che è l'angolo compreso tra il nord geografico e la direzione del vento.

In base alla direzione i venti possono essere classificati nella “*rosa dei venti*”, in cui ogni quadrante, determinato dai punti cardinali è diviso in quattro parti uguali, ed è lo strumento usato per definire la direzione prevalente del vento.



31. Rosa dei venti.

La direzione si misura con gli anemoscopi, banderuole che si dispongono in direzione del vento. Anche in questo caso i dati possono essere registrati e catalogati. Questa elaborazione fa in modo di ottenere la “*rosa dei venti locale*” che indica, su un grafico in coordinate polari, le direzioni prevalenti dei venti nella zona presa in esame.



32. Rosa dei venti locale (fonte: <http://www.quietrevolution.co.uk/>).

E' molto utile sapere la direzione prevalente per sapere dove orientare l'aerogeneratore nel caso sia fisso, oppure per orientare la scelta su una differente tecnologia come quella di turbine ad asse verticale in caso di estrema variazione della direzione del vento.

8.2.3 Elaborazione dei dati ottenuti.

Dai dati ottenuti con la campagna anemometrica oppure tramite l'acquisizione di dati da stazioni meteorologiche preesistenti si possono ottenere dei grafici che aiutano a capire le potenzialità eoliche del sito.

In questo caso esaminiamo le potenzialità eoliche di Arusha, in Tanzania a sud del monte Meru, nel biennio 2007/08. Le misurazioni sono state prese dalla stazione meteorologica di Arusha (lat -3,36; Long 36,31; altitudine 1387 m) e rintracciabili sul sito <http://www.tutempo.net/en>.

Le misurazioni prese in considerazione riportano una media giornaliera dei valori di velocità del vento quindi potranno solo dare un'idea della variazione durante la giornata. Restano comunque un'ottima base di partenza per la valutazione preliminare.

Per un primo confronto con altri siti è possibile calcolare:

Velocità media (m/s)	4,63
Velocità media cubica (m/s) ³	99,07
Velocità massima (m/s)	11
Deviazione standard σ	1,46
Intensità di turbolenza media	0,36

Si può subito notare dalla media della velocità che questo sito non ha un grandissimo potenziale eolico e dall'indice di turbolenza alto (il valore ottimale dovrebbe essere compreso tra 0,1 – 0,2) si evince la variabilità alta della risorsa eolica.

La velocità massima è di 11 m/s, circa 40 km/h, e indica il limite di velocità. Si può osservare che il valore è basso se confrontato con siti dedicati specificatamente all'eolico.

Ulteriori indicazioni si possono ottenere dalla distribuzione della frequenza, o persistenza, di giorni/anno dell'intensità del vento. Sarebbe molto più opportuno avere il numero di ore/anno dei valori di intensità del vento, ma in assenza di tali valori, ed in funzione del fatto che è un'analisi preliminare, tali valori sono da definirsi accettabili.

I dati raccolti vengono divisi in classi di velocità a seconda dell'intervallo in cui si inseriscono; avremo quindi la prima classe 0 dove vengono raggruppati i giorni in cui la velocità media giornaliera del vento è stata 0 m/s, e nel caso analizzato la frequenza è 0, per poi passare alla classe 1 dove si contano i giorni in cui la velocità media del vento è stata 1 m/s e così via fino a classificare tutti i valori.

Un altro termine da tenere in considerazione è la frequenza relativa f_i che si esprime come:

$$f_i = \frac{n_i}{N_r}$$

dove:

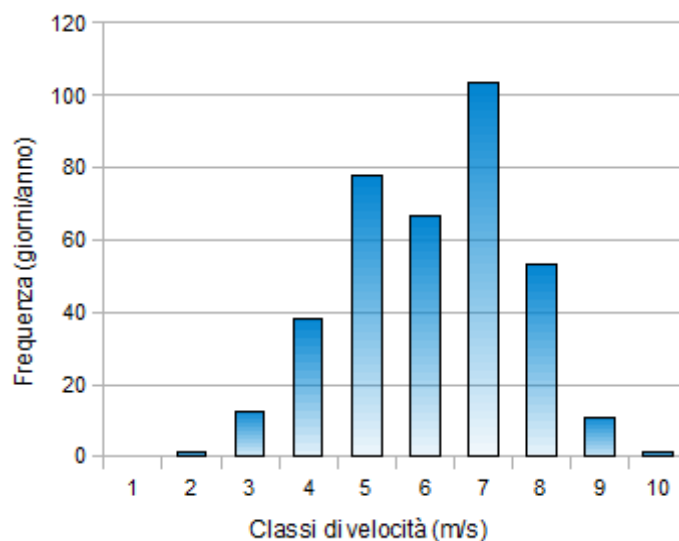
n_i numero di giorni di persistenza del vento nella classe presa in considerazione;

N_r numero totale delle rilevazioni, nel caso in analisi 645 giorni.

Classi di velocità del vento (m/s)	Frequenza (giorni/tot giorni)	Frequenza relativa
0	0	0,000
1	2	0,003
2	22	0,034
3	67	0,104
4	138	0,214
5	118	0,183
6	183	0,284
7	94	0,146
8	19	0,029
9	2	0,003

Le frequenze si possono calcolare anche in ore/anno, e danno un'idea più precisa del potenziale anemometrico del sito.

Dalla suddivisione in classi di velocità presente nella tabella 6) è possibile ottenere un istogramma, per facilitare la comprensione dei dati:



33. Distribuzione della frequenza di velocità del vento.

Per una corretta rappresentazione della distribuzione di frequenza nel campo dell'energia eolica viene utilizzata la *Distribuzione di Weibull*, che permette di avere una buona approssimazione sull'andamento della fonte eolica.

La distribuzione di Weibull si esprime analiticamente in questo modo:

$$p(u) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]$$

dove:

c fattore di scala, è legato in modo biunivoco alla velocità media e talvolta si fa riferimento proprio alla velocità media quando si inserisce il fattore di scala. Le dimensioni di c sono quelle di una velocità;

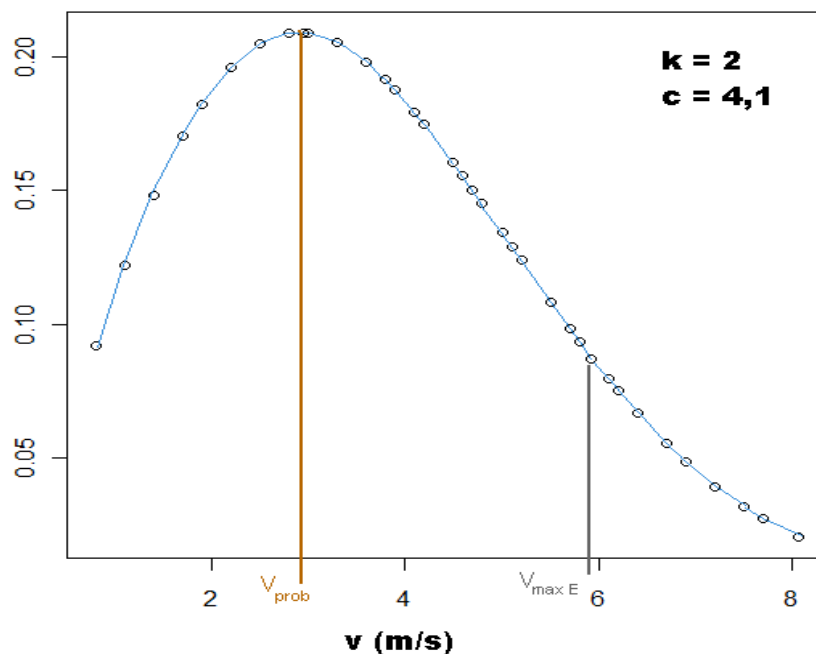
k fattore di forma, è adimensionale e modifica la simmetria della distribuzione.

Una semplificazione della distribuzione di Weibull si ha quando si assume k pari a 2, cambiando nome alla distribuzione che prende il nome di *distribuzione di Rayleigh*. È ampiamente utilizzata dai costruttori di turbine eoliche come distribuzione di riferimento e può essere usata per valutazioni di larghissima scala quando si dispone solo dei valori di velocità media.

Nel caso preso in esame, considerato che la velocità media è l'unico dato disponibile, si è scelto di usare la distribuzione di Rayleigh, quindi:

k 2;

c 4,1 corrispondente al 90% del valore della velocità media.



34. Distribuzione di Rayleigh per il sito di Arusha (Tanzania) nel biennio 2007/08.

Sulle ascisse viene rappresentata la velocità del vento, sulle ordinate la densità di probabilità.

Una volta noti c e k è inoltre possibile ricavare:

- velocità più probabile

$$22 \quad v_{prob} = c \left(\frac{k-1}{k} \right)^{\frac{1}{k}} [m/s]$$

- velocità con maggior densità di energia

$$23 \quad v_{maxE} = c \left(\frac{k+2}{k} \right)^{\frac{1}{k}} [m/s]$$

Nel caso di Arusha avremo:

v_{prob} 2,94 m/s

v_{maxE} 5,89 m/s

Per poter calcolare la potenza occorre conoscere la densità dell'aria e servendoci della 8) risulta:

ρ_{1387} 1,05 kg/m³

Dai valori di velocità ottenuti ed usando la 5) ed una superficie unitaria si trova la potenza disponibile del vento:

$$P_{\text{prob}} = 13,38 \text{ W}$$

$$P_{\text{max p}} = 107,01 \text{ W}$$

Le potenze trovate vanno moltiplicate per il coefficiente di Betz, in modo da ricavare la massima potenza estraibile dalla turbina eolica. Dalla 12) ricaviamo:

$$P_{e \text{ prob}} = 7,93 \text{ W}$$

$$P_{e \text{ max p}} = 63,46 \text{ W}$$

Le potenze effettivamente estraibili saranno ancora più basse rispetto a quelle calcolate perché non si è tenuto dei rendimenti dovuti al generatore, alle perdite localizzate sulla turbina e le perdite dovute alla turbolenza, che come visto in precedenza è significativa.

Una normale lampadina ad incandescenza consuma 30 W e paragonata alla potenza che ci potrebbe fornire un aerogeneratore posto nel sito appena analizzato, si può concludere che il sito di Arusha è scarsamente fruibile dal punto di vista dell'eolico.

8.3 IMPATTI AMBIENTALI.

La realizzazione di una turbina eolica e la scelta del sito non possono prescindere dalla stima degli impatti ambientali, al fine di valutare le conseguenze che una nuova installazione provoca sul paesaggio e più in generale sull'ambiente circostante.

I parametri che occorre valutare sono:

- paesaggio e impatto visivo;
- impatto su flora e fauna in particolare sull'avifauna;
- impatto acustico;
- disturbi elettromagnetici;
- ombra proiettata.

Naturalmente uno studio di impatto ambientale deve essere rivolto specificatamente al sito nel quale si intende installare l'impianto composto da una o più turbine.

Si possono tuttavia tracciare delle linee guida riguardanti la situazione generale in modo da poter avere un quadro sufficientemente definito anche in fase di studio del sito nel quale verrà installato l'impianto.

Nel caso di turbine eoliche nell'ordine dei MegaWatt, quindi con altezze complessive dell'impianto elevate anche superiori a 80 metri, è necessario uno studio approfondito che termini con una Valutazione di Impatto Ambientale e con il conseguente ma non consecutivo rilascio di autorizzazioni da parte delle autorità competenti.

Ad esempio in Italia esiste un quadro normativo generale che ogni Regione prende come riferimento per legiferare.

Le linee guida nazionali indicano come obbligatoria la Valutazione di Impatto Ambientale e la successiva discussione della stessa in Conferenza dei Servizi per installazioni superiori ai 100 kW, al fine di valutare l'impatto che ha l'inserimento di una turbina o di un parco eolico sul territorio. Inoltre ogni Regione individua delle aree di particolare interesse paesaggistico e naturalistico, di interesse agrario, archeologico, storico ed architettonico.

Diverso è il discorso per quanto riguarda il micro-eolico. Anch'esso presenta un impatto ambientale in quanto è pur sempre una macchina che si va ad inserire in contesto ambientale ma il suo impatto sul paesaggio circostante è di gran lunga inferiore ad una turbina nell'ordine del medio e grande eolico.

In questo capitolo si prenderà in considerazione l'impatto ambientale generato da una tipica

turbina micro-eolica al fine di valutarne l'inserimento in un contesto paesaggistico quasi incontaminato come quello presente in taluni siti nei PVS.

Il contesto analizzato è quello di un tipico villaggio rurale africano.

8.3.1 Paesaggio ed impatto visivo.

Un impianto micro-eolico dovrà essere necessariamente installato in prossimità dell'utenza, quindi in luoghi già modificati dalla presenza umana. L'installazione avviene generalmente sui tetti delle poche strutture in muratura presenti nelle comunità servite.

È stato usato il metodo di calcolo proposto dalla Regione Toscana in quanto non è stato possibile trovare normative simili nei PVS, poiché le principali leggi a difesa dell'ambiente riguardano lo sfruttamento di risorse minerarie e petrolifere. Inoltre le problematiche riguardanti l'eolico non sono ancora di attualità vista la scarsa diffusione di questa tecnologia.

Questo però non può permettere all'installatore di non valutare gli impatti presenti e di non tener conto della sostenibilità e appropriatezza della tecnologia inserita.

La metodologia usata dalla Regione Toscana dipende esclusivamente dall'altezza della turbina, ma presenta il notevole vantaggio di essere di facile comprensione e applicabilità, utilizzabile quindi in aree dove il tasso di istruzione è ancora basso. Altri metodi come il metodo EDENS sviluppato da Edison od il metodo Lassiere (*Dep. Of the Enviroment, 1978*) sono molto più completi ma in contesto come quello rappresentato dai PVS avrebbe avuto ben poca applicabilità da parte della popolazione locale in quanto entrambi presentano nella loro struttura operatori matematici complessi quali funzioni trigonometriche.

Nei PVS l'altezza massima delle costruzioni raggiunge i 4 metri, infatti la quasi totalità degli edifici non supera il primo piano. L'altezza massima prevista, considerando anche l'installazione della turbina sul tetto della struttura, è di 5,5 metri tenendo come punto di riferimento il suolo.

L'impatto visivo è molto ridotto e non altera il paesaggio circostante poiché l'installazione non prevede il raggiungimento di altezze eccessive.

L'intrusione visuale è calcolabile e nel caso specifico è stata usata la normativa della Regione Toscana che definisce il raggio di influenza visiva di un impianto come:

$$^{24} \quad r = (100 + n) \cdot h [m]$$

dove:

n	numero aerogeneratori
h	altezza complessiva impianto



35. *Simulazione impatto visivo VentolOne 1.1.*

Sono già state esplicitate le motivazioni che hanno portato alla scelta del metodo di calcolo proposto dalla Regione Toscana.

Prendendo in esame una tipica costruzione adibita a scuola o ad ambulatorio come il caso evidenziato nella figura precedente si può ipotizzare un primo calcolo. La richiesta principale di energia elettrica nei PVS è concentrata appunto alle scuole o agli ambulatori dove viene utilizzata per l'illuminazione, per il funzionamento di computer o frigoriferi per la conservazione di medicinali deperibili.

Il caso in esame comprende:

una singola unità eolica installata ed un'altezza totale di 5,5 m.

il raggio d'influenza calcolato secondo la normativa della Regione Toscana è 555,5 m. l'impatto visivo è quindi molto ridotto, e sicuramente inferiore a quello di altre costruzioni tipicamente impiegate nei PVS come i serbatoi per l'accumulo di acqua; un serbatoio di medie dimensioni posto a 12 m di altezza ha un raggio di influenza pari a 1212 m, decisamente più elevato.

L'installazione in aree utilizzate per altri scopi, come l'agricoltura o la pastorizia, non modifica la destinazione d'uso del terreno rendendo minimo anche l'impatto fisico della turbina e della tecnologia eolica in genere sul sito designato all'installazione.

8.3.2 Impatto su flora e fauna in particolare sull'avifauna.

Vista la posizione in cui necessariamente deve inserirsi un impianto micro-eolico, quindi solidale col tetto di una costruzione oppure in cima ad una torre di altezza non superiore ai 10 metri, le interferenze con flora e fauna sono minime.

L'impatto maggiore nei confronti della flora riguarda la fase di installazione e rimozione della turbina, in quanto il trasporto del VentolOne stesso richiede l'impiego di un autoveicolo con la conseguente intrusione in un prato nel caso venga installato in lontananza dal centro abitato. Nel caso in cui, come previsto, venga collocato in un villaggio l'impatto sulla flora anche in fase di installazione è nullo in quanto l'ambiente è già stato modificato dalla presenza umana.

Per quanto riguarda l'impatto nei confronti della fauna locale la presenza dell'aerogeneratore non crea disturbi ad animali domestici e greggi di animali allevati per la pastorizia, poiché la posizione elevata non permette alla fauna di interagire con la turbina.

La presenza di volatili è generalmente oggetto di analisi accurata nella valutazione di impatto ambientale di un sito dove si vuole installare una macchina eolica. È probabile che volatili passino nell'area interessata dal movimento delle pale della turbina urtando accidentalmente contro di esse.

Questo problema è particolarmente sentito in zone soggette a flusso migratorio da parte di alcune specie di volatili in quanto è possibile che uno stormo intercetti nella sua rotta un aerogeneratore. Naturalmente molto dipende dalle dimensioni della turbina; un aumento della superficie spazzata incide negativamente su questo aspetto. Una normale turbina micro-eolica ha una superficie massima di 2 m² riducendo ai minimi termini il rischio di collisione.

Inoltre esperienze svolte in Danimarca e negli Stati Uniti (Erikson et al. 2001) hanno evidenziato che gli uccelli migratori deviano le proprie rotte in presenza di aerogeneratori mantenendo una certa distanza di sicurezza, stimando nello 0,01-0,02% la mortalità dei volatili causata dall'impatto con le turbine eoliche rispetto alla mortalità complessiva degli stessi.

Un altro parametro da tenere in considerazione è l'altezza della turbina; gli stormi generalmente volano a quote superiori ai 20 metri di altezza. È molto improbabile che una turbina micro-eolica venga installata ad un'altezza superiore ai 10 metri in quanto progettata per essere installata sul tetto di costruzioni in muratura, che nei Paesi in Via di Sviluppo non superano il piano terra.

La probabilità di impatto di un volatile con la turbina eolica aumenta con l'aumentare della velocità delle pale.

Va ricordato che il grosso vantaggio dato da questa tipologia di turbine è l'area ridotta che

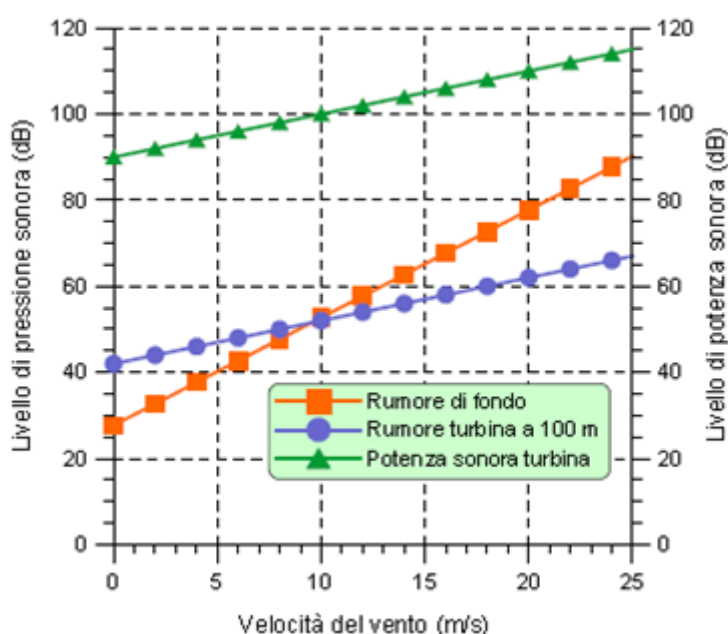
riduce praticamente azzera la possibilità di contatto di un volatile.

8.3.3 Impatto acustico.

La principale fonte di rumore sono le pale del rotore, in quanto maggiore è la velocità di rotazione maggiore è l'impatto acustico prodotto dalla turbina.

Altra fonte di rumore è la meccanica stessa della turbina in quanto gli attriti provocano vibrazioni e di conseguenza rumore. I materiali usati influenzano molto la presenza del rumore; nel caso di un aerogeneratore costruito con materiali di recupero gli attriti sono notevoli provocando un sensibile aumento della pressione acustica di un aerogeneratore standard.

È possibile stimare tramite il grafico successivo la pressione sonora che una turbina ha nei confronti dell'ambiente circostante in funzione della velocità del vento.



36. Pressione sonora turbina eolica (fonte: www.energiadalvento.com).

Il micro-eolico è generalmente progettato per sfruttare velocità del vento comprese tra 3 e 14 m/s e dalla figura si può osservare come a distanza di 100 metri il rumore prodotto dalla turbina sia pressoché simile al rumore di fondo dato dalla sola azione del vento. Il rumore di fondo è inteso solo come il rumore prodotto dal vento.

La fascia di funzionamento del micro-eolico rimane sempre al di sotto dei 60 dB, valore ampiamente accettabile.

Bisogna però osservare che nei villaggi il rumore di fondo è assente e che le scuole primarie ospitano il maestro durante la notte, e le scuole secondarie ospitano allievi e insegnanti durante tutto il periodo scolastico.

È possibile calcolare l'impatto acustico della turbina eolica valutando il livello di pressione sonora espresso in decibel (dB):

$$25 \quad L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB]$$

dove:

- p pressione sonora della turbina;
p₀ valore standard di riferimento pari a 2·10⁵ Pa.

Per le valutazioni di impatto acustico sugli impianti eolici si utilizza la scala di ponderazione A nella quale vengono definiti i limiti di pressione sonora per aree residenziali individuando il limite massimo durante il periodo diurno in 55 dB(A) e 45 dB(A) durante la fascia notturna.

Nei PVS non sono disponibili normative che prevedono limiti di pressione sonora.

Nel caso vengano installate più turbine eoliche occorre tenere in considerazione gli effetti complessivi, che sono calcolabili nel seguente modo:

$$26 \quad L_p = 20 \log \left(\frac{p_1}{p_0} + \frac{p_2}{p_0} + \dots + \frac{p_n}{p_0} \right) [dB]$$

Il contributo complessivo di impatto acustico non deve superare i limiti precedentemente esposti.

8.3.4 Disturbi elettromagnetici.

Le principali interferenze elettromagnetiche sono dovute alla presenza di più aerogeneratori di grandi dimensioni sul territorio; i maggiori disturbi riguardano principalmente interferenze delle onde radio dovute al movimento di grandi pale non provocando comunque disturbi elettromagnetici rilevanti nelle zone circostanti.

Per quanto riguarda il micro-eolico non sono stati evidenziati problemi di grande rilevanza e tutte le apparecchiature elettriche ed elettroniche presenti nelle sue vicinanze durante il funzionamento non risentito della presenza della turbina.

8.3.5 Ombra proiettata

Questo problema riguarda soprattutto impianti di dimensioni considerevoli. Nel caso del mini e micro-eolico l'ombra proiettata è praticamente nulla.

9 CLASSIFICAZIONE DELLE TECNOLOGIE EOLICHE.

Per poter sfruttare la risorsa eolica nel tempo si è realizzata una serie notevole di aerogeneratori.

La principale classificazione che si può fare per suddividere le turbine eoliche è secondo:

- **principio fisico;**
- **principio tecnologico;**
- **taglia della turbina.**

9.1 Principio fisico.

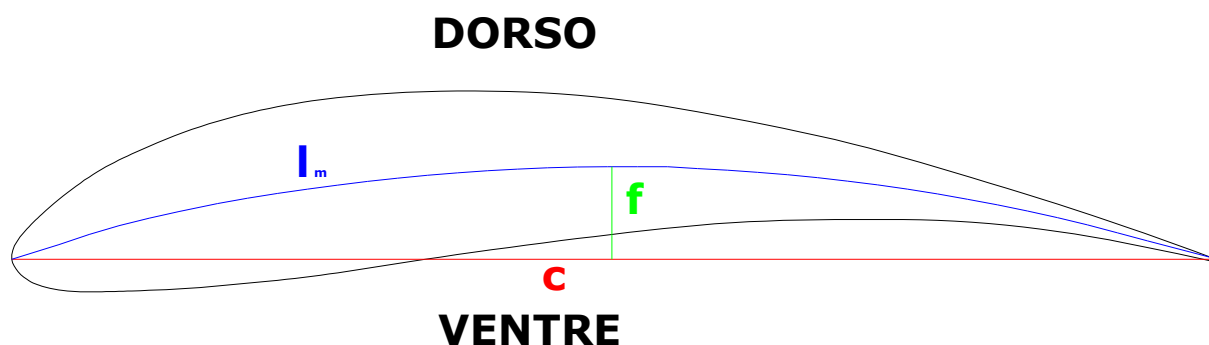
Questa prima classificazione si basa sul principio fisico che regola il funzionamento della turbina, in poche parole su qual è la forza che sfrutta l'aerogeneratore per ruotare:

- **turbine eoliche a portanza;**
- **turbine eoliche a resistenza.**

9.1.1 Turbine eoliche a portanza.

Questa tipologia di turbine sfrutta il principio aerodinamico della portanza, la stessa forza che sostiene gli aerei.

Le pale saranno quindi dei profili alari veri e propri, che sfruttano le forze aerodinamiche.



37. *Profilo alare.*

Una corrente fluida, quando investe un profilo alare, si divide per poter meglio aggirare

l'ostacolo creato dal profilo stesso.

Una parte della corrente passerà al di sopra dell'ala, sulla parte chiamata *dorso del profilo*, mentre la seconda parte della corrente fluida scorrerà al di sotto, sulla parte chiamata *ventre del profilo*.

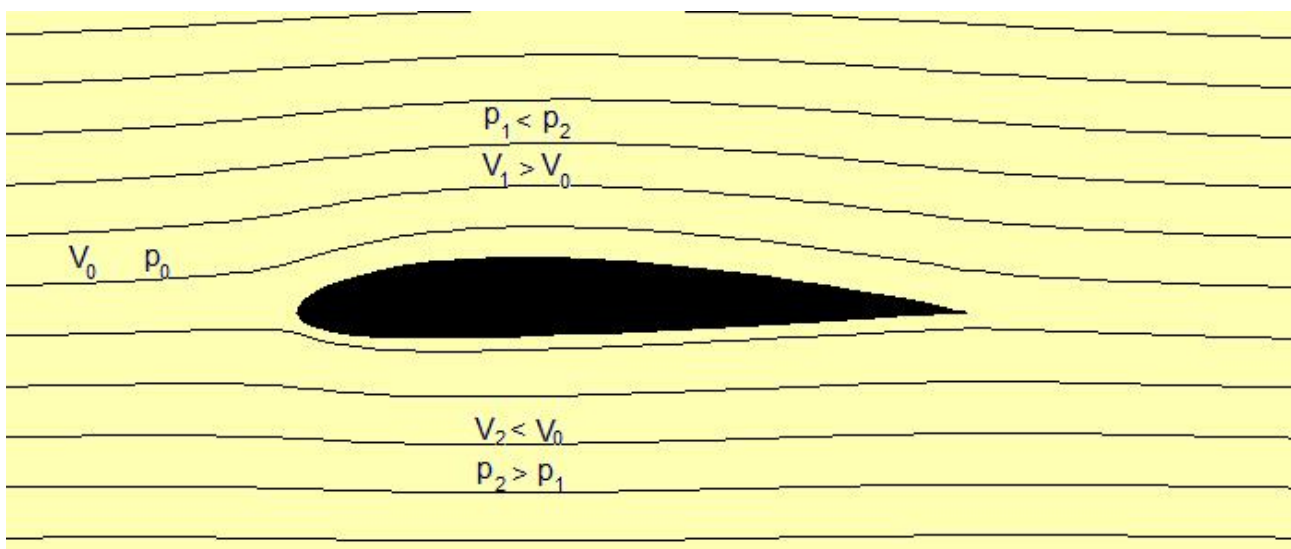
In figura 37. sono indicate:

c	corda alare; distanza minima dal bordo d'attacco al bordo d'uscita (rosso);
f	freccia alare; distanza tra la linea mediana e la corda del profilo (verde);
l_m	linea mediana o curvatura del profilo; linea equidistante dal dorso e dal ventre

In accordo col teorema di Bernulli, dove si afferma che la somma di pressione, altezza cinetica (data dalla velocità) e quota piezometrica rimanga costante, si osserva che la velocità della corrente fluida che passa sul dorso aumenta, diminuendo in questo modo la pressione, mentre sul ventre la velocità diminuisce aumentando la pressione. L'altezza piezometrica rimane invariata.

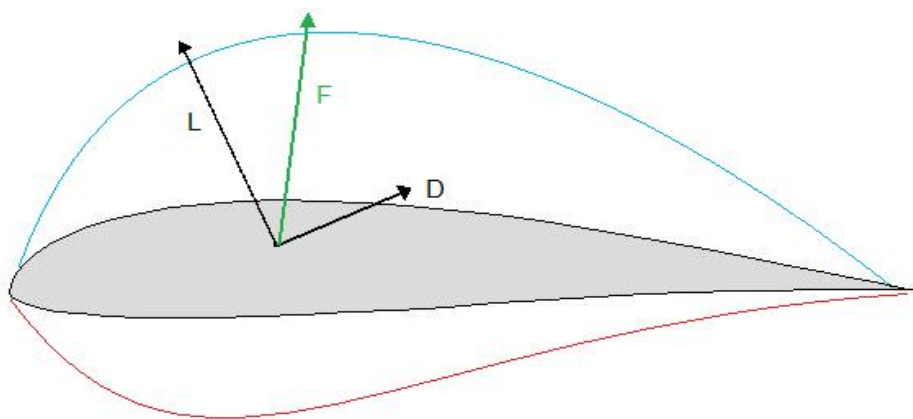
$$^{27} \quad \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} + z = cost$$

Dalla figura successiva si capisce come l'aria si muove intorno al profilo e come le grandezze p e v siano inversamente proporzionali l'una rispetto all'altra.



38. Andamento della corrente fluida attorno al profilo (realizzato con JavaFoil).

Sul dorso del profilo si genera una depressione, rappresentata in blu, mentre sul ventre si crea una pressione positiva, in rosso. Questa differenza di pressioni genera una forza F , in verde, diretta verso l'alto.



39. Forze agenti sul profilo alare.

La forza F prodotta si scompone in:

L; portanza (dall'inglese Lift). È la forza che permette il sostentamento dei velivoli e nel caso di un aerogeneratore a portanza è la forza che ne permette il movimento.

D; resistenza (dall'inglese Drag). È la forza che si oppone al movimento del profilo.

Portanza e resistenza possono essere facilmente calcolate:

$$28 \quad L = \frac{1}{2} C_L \rho S v^2 [N]$$

$$29 \quad D = \frac{1}{2} C_D \rho S v^2 [N]$$

dove:

ρ densità dell'aria (kg/m^3);

S superficie alare (m^2);

v velocità del vento (m/s);

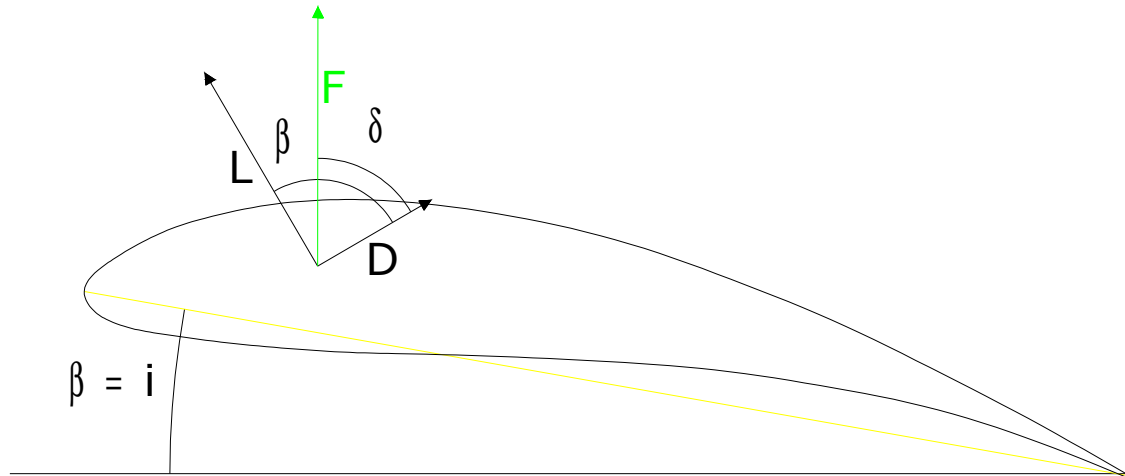
C_L coefficiente di portanza;

C_D coefficiente di resistenza.

La superficie alare è ottenuta moltiplicando la *corda* c del profilo e la sua *lunghezza* l , ortogonale al foglio.

$$30 \quad S = c \cdot l [m^2]$$

I coefficienti di portanza e resistenza, adimensionali, sono tabellati per ogni tipologia di profilo e variano al variare dell'angolo di attacco del profilo β , l'*incidenza* (i), cioè l'angolo formato dalla corda e la direzione della velocità v .



40. Angoli caratteristici.

Coefficiente di portanza e di resistenza sono tabellati per ogni tipo di profilo alare e tra di loro sono legati dalla seguente relazione:

$$^{31} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{C_L}{C_D} = \frac{L}{D} = E$$

Questo valore rappresenta anche l'efficienza E del profilo, cioè la bontà del profilo stesso, perché è il rapporto tra il carico che possiamo generare in relazione a quanto dobbiamo spendere in termini di resistenza. L'efficienza è il reciproco del coefficiente di attrito e da un'idea precisa di quanto il profilo alare sia buono in termini aerodinamici. Un'efficienza alta è caratteristica di un buon profilo.

La forza F agisce sul profilo alare generando un *momento aerodinamico*, il cui punto d'azione è il *centro di pressione aerodinamico*, situato generalmente al 25% della corda alare. Esso è un parametro fondamentale per la progettazione aerodinamica e strutturale dell'ala.

Esiste un parametro λ_a (allungamento alare) di cui si deve tenere conto in fase di progettazione che serve per definire le caratteristiche geometriche dell'ala stessa. È definito come:

$$^{32} \quad \lambda_a = \frac{l^2}{S} = \frac{l}{c}$$

dove:

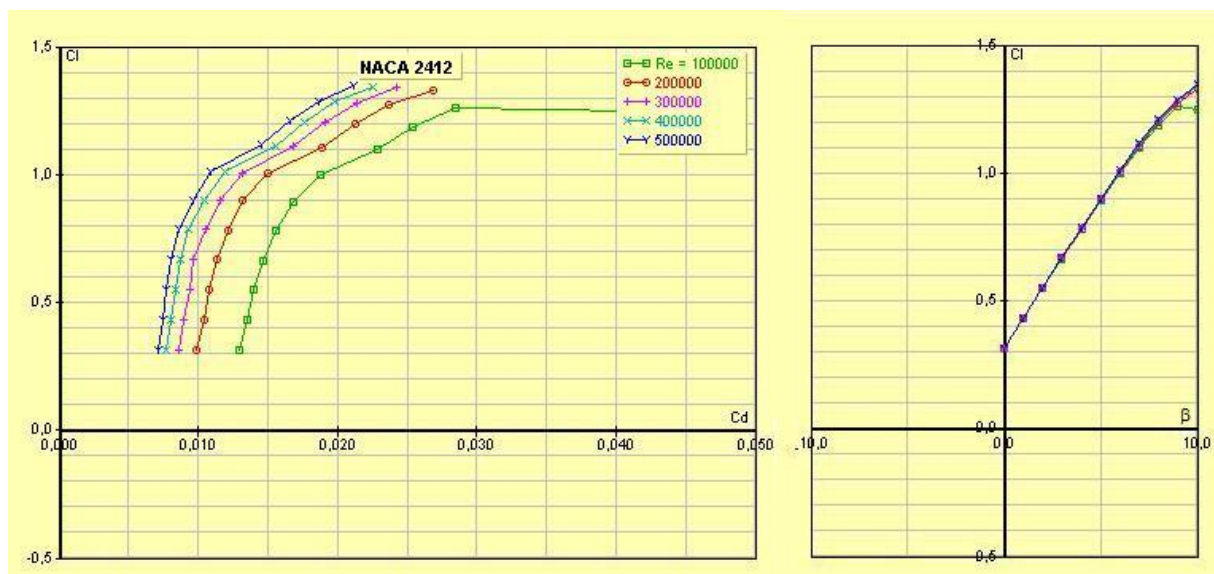
l apertura alare (m);

S superficie alare (m²);
 c corda alare (m).

Nella terminologia anglosassone questo parametro viene definito come Aspect Ratio (AR).

Grandi allungamenti diminuiscono la resistenza indotta dal profilo e si usano per velivoli lenti e leggeri, mentre bassi allungamenti alari generano un'alta resistenza indotta. Lo svantaggio di avere un alto allungamento alare sta nel fatto che il profilo è particolarmente soggetto a torsione e flessione.

Le figure successive costituiscono di fatto la polare del profilo, cioè i grafico riassuntivo delle caratteristiche del profilo stesso, ed indica come varia C_L al variare di C_D , oltre che come varia C_L in funzione dell'angolo d'incidenza β . Si può facilmente notare come C_L sia due ordini di grandezza più grande rispetto a C_D .



41. Polare di un profilo NACA 2412 a diversi valori di Re . (realizzato con JavaFoil).

Osservando le equazioni 28) e 29) si capisce come a parità di intensità di vento la portanza risulti due ordini di grandezza più grande rispetto alla resistenza e di conseguenza sia più conveniente in termini energetici.

Le caratteristiche del fluido fanno variare il numero di Reynolds (Re) che a sua volta andrà a modificare le prestazioni del profilo influenzando C_L e C_D .

Il numero di Reynolds influenza molto il comportamento del profilo, in quanto a bassi valori di Re corrispondono i valori di C_R più alti a parità di C_L . Il numero di Reynolds è un indice qualitativo adimensionale dell'andamento della corrente fluida ed è definito come:

$$Re = \frac{v L_c}{\nu}$$

dove:

- v velocità del fluido (m/s);
- L_c lunghezza caratteristica del profilo (m);
- ν viscosità cinematica del fluido (m²/s).

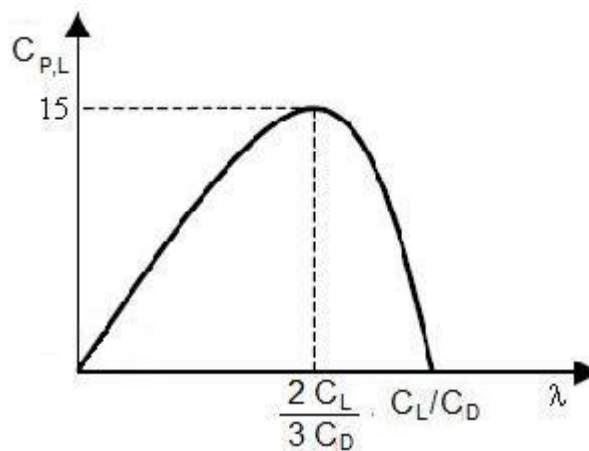
La lunghezza caratteristica del profilo alare viene fatta coincidere con la corda.

Naturalmente a diversi angoli di attacco varia la portanza del profilo, aumentando proporzionalmente con l'aumentare dell'angolo di attacco, fino ad arrivare al limite di stallo in cui il filetto fluido si stacca dal profilo, non generando più portanza. In questo modo il profilo alare perde la sua funzione.

A questo limite corrisponde un angolo ben preciso che vale per ogni profilo ed è determinato per ogni numero di Reynolds e velocità del profilo.

Per un profilo alare, una volta conosciuti C_L e C_D e ricordando la Tip Speed Ratio, è possibile definire il coefficiente di potenza del profilo:

$$^{34} \quad C_{P,L} = \sqrt{1 + \lambda^2} \cdot (C_L - C_D \cdot \lambda) \cdot \lambda$$



42. Andamento del coefficiente di potenza del profilo in funzione delle caratteristiche del profilo.

Come si evince il $C_{P,L}$ è massimo quando il rapporto tra il coefficiente di portanza e quello di resistenza è circa 2/3, mentre si annulla per valori di λ pari a zero e pari C_L / C_D .



43. Esempi di turbine eoliche a portanza.

9.1.2 Turbine eoliche a resistenza.

Qualsiasi corpo, portante e non, immerso in una corrente fluida subisce una resistenza all'avanzamento dovuta ad attrito e scia.

I convertitori eolici a resistenza sfruttano queste forze per sottrarre energia al vento e convertirla in energia elettrica e/o meccanica.

La forza F indotta dalla velocità del vento determina il moto del rotore intorno al suo asse. I rotori a resistenza sono tutti ad asse verticale. Il calcolo della resistenza è il medesimo calcolo che viene usato per calcolare la resistenza di un profilo, ricordando la 29):

$$29) \quad D = \frac{1}{2} C_D \rho S v^2 [N]$$

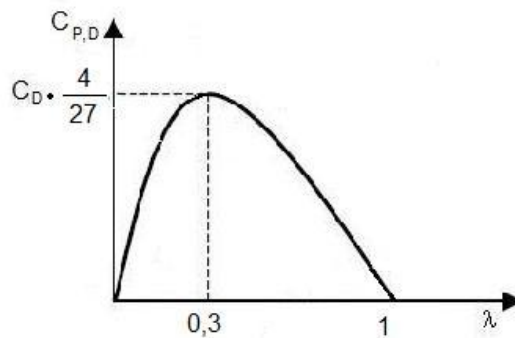
dove C_D è stato ricavato sperimentalmente e varia a seconda della forma dell'oggetto in movimento, nel caso di un aerogeneratore a resistenza le pale.

Forma dell'oggetto	C_D
Lastra rettangolare sottile normale alla corrente	1,26
Lastra circolare sottile normale alla corrente	1,08
Semisfera convessa	0,32
Semisfera cava	1,60
Cilindro sagomato	0,12
Fune	1,12

S è l'area del rotore intercettata dal vento.

In modo analogo al $C_{P,L}$ è possibile trovare il coefficiente di potenza a resistenza:

$$35 \quad C_{P,D} = C_D (1 - \lambda)^2 \cdot \lambda$$



44. Coefficiente di potenza a resistenza.

È facile notare come $C_{P,D}$ si azzeri per:

$\lambda = 0$, cioè a profilo fermo;

$\lambda = 1$, cioè quando velocità del vento e velocità del profilo si equivalgono.

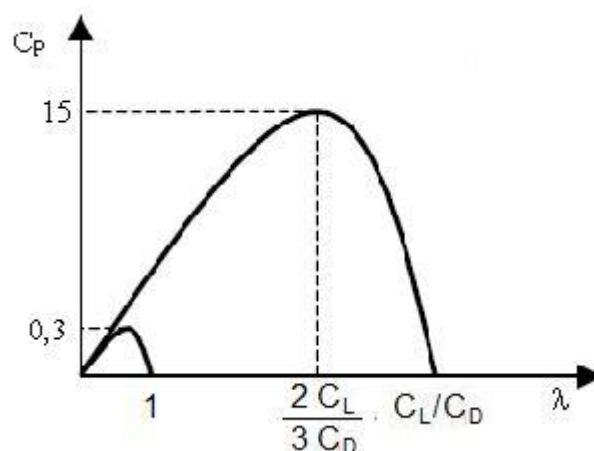
Mentre assume il valore massimo per $\lambda = 0,3$ e vale $4/27 C_D$.

Possiamo così confrontare i coefficienti di potenza per un convertitore eolico a portanza ed uno a resistenza:

prendendo il C_D massimo, che è della semisfera cava e vale 1,60, è possibile trovare il $C_{P,Dmax}$ che vale:

$$36 \quad C_{P,Dmax} = \frac{4}{27} \cdot 1,60 = 0,237$$

questo valore confrontato con $C_{P,Lmax}$, che è pari a 15, risulta davvero irrisorio come è possibile confrontare visivamente nel grafico seguente:

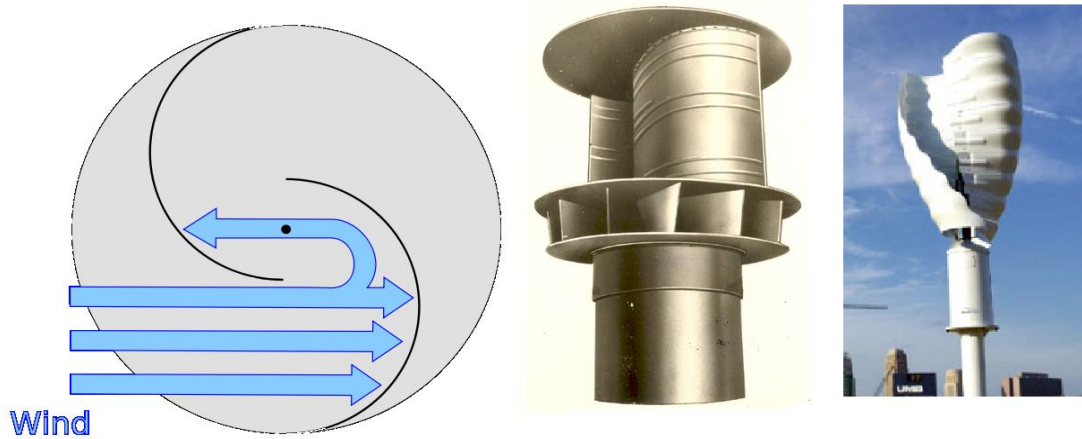


45. Confronto tra coefficiente di potenza a portanza e coefficiente di potenza a resistenza.¹⁰

10 Figura 45. D. Cocco, C. Palomba. (2008) Dispense "Energia eolica" capitolo 2 pag 30, Università degli

Ciò sta a significare che a parità di vento i rotori a portanza riescono a produrre più energia rispetto agli aerogeneratori a resistenza.

Per questo motivo i primi hanno avuto maggior successo e sviluppo dei secondi per applicazioni industrializzate.



46. Funzionamento ed esempi di rotori eolici a resistenza.

9.2 Principio tecnologico.

Questa seconda classificazione è basata sull'orientamento dell'asse di rotazione dell'aerogeneratore che, come vedremo, andrà ad influenzare notevolmente le condizioni d'utilizzo della risorsa eolica.

Possiamo distinguere le tecnologie eoliche come:

- turbine eoliche ad asse orizzontale (HAWT; Horizontal Axis Wind Turbine);
- turbine eoliche ad asse verticale (VAWT; Vertical Axis Wind Turbine).

9.2.1 Turbine eoliche ad asse orizzontale (HAWT).

Si può subito affermare che la tipologia di macchine eoliche preponderante sul mercato è questa.

La tecnologia ad asse orizzontale è stata la prima ad essere sfruttata nella storia, basti pensare il mulino persiano o i mulini a vento olandesi, ed è logico che si sia sviluppata una maggiore conoscenza di questa tipologia di aerogeneratori.

Le turbine ad asse orizzontale essenziali sono composte da:

- torre;

- rotore;
- moltiplicatore di giri.

Col tempo e soprattutto con il progredire della tecnologia nel campo elettronico, meccanico e dei materiali gli aerogeneratori ad asse orizzontale sono diventati sempre più complessi tanto che all'interno della navicella, che è la “scatola” posta in cima alla torre, sono alloggiati, oltre al moltiplicatore di giri, il trasformatore, l'alternatore, i sensori di direzione ed intensità del vento, il sistema di freno del rotore, meccanismo di orientamento delle pale.

Nel capitolo “Componenti di un impianto eolico” andremo a descrivere ed analizzare le singole parti di cui si compone una turbina eolica.

Le moderne HAWT vengono generalmente utilizzate per produrre energia elettrica ed è per questo che risultano essere molto più complesse dal punto di vista impiantistico rispetto alle vecchie tipologie usate fino agli inizi del '900, che avevano essenzialmente il compito di azionare sistemi per il pompaggio di acqua, come le classiche Windmill americane, o azionare mulini per la produzione di farina, ad esempio i mulini a vento in Olanda.



47. Mulino a vento olandese (sinistra); Windmill americana (destra).

I rotori ad asse orizzontale lavorano per portanza, necessitando perciò di un flusso dell'aria molto “pulito”. Abbiamo visto precedentemente che l'intensità ventosa è direttamente proporzionale all'altezza da terra, mentre l'intensità di turbolenza lo è inversamente.

Questi parametri, oltre alle dimensioni delle pale, suggeriscono ai costruttori passati e presenti di posizionare l'asse di rotazione del rotore il più in alto possibile, da 20-30 metri nel caso di turbine di piccola taglia fino a 80 metri per aerogeneratori di 2-3 MW.

Il numero di pale può variare da 1 fino ad una dozzina nel caso dei Windmill americani, ma per impianti standard si usano 3 pale.

Le HAWT possiedono i valori di λ più elevati di tutti gli altri aerogeneratori, variando da 4 a 7 con una media di 5,5. Lavorando con λ così elevati hanno la capacità di essere anche molto efficienti avendo un C_p massimo intorno a 0,48, ricordando che il limite di Betz impone un valore massimo raggiungibile di 0,593.

Inoltre lavorano con una coppia molto bassa e questo contribuisce notevolmente a migliorare l'affidabilità complessiva degli organi in movimento.

La rotazione delle pale può variare da 10 a 22 giri al minuto, anche se in alcune installazioni la velocità di rotazione rimane costante, impedendo la completa estrazione di energia dal vento.

La maggior parte dei rotor ha installate pale ad angolo di attacco variabile. Le pale possono ruotare attorno al loro asse longitudinale permettendo di avere sempre l'angolo di attacco ottimale e di conseguenza poter avere sempre valori di λ ottimi. Abbiamo visto come il coefficiente di potenza rotorico sia strettamente dipendente da λ , per questo la variazione della Tip Speed Ratio consente all'aerogeneratore girare a valori di C_p massimi.

Un altro fattore che influisce notevolmente sulle prestazioni è la possibilità di sfruttare frontalmente il flusso d'aria che le investe, quindi tutta la sua componente di velocità.



48. Turbina HAWT orientabile (fonte: quietrevolution.com).

Qualora il vento non investisse perpendicolarmente il rotore esiste la possibilità per alcuni aerogeneratori, generalmente i più moderni, di potersi orientare ruotando lungo l'asse della torre. Questi generatori sono detti “ad inseguimento”.

Le HAWT sono dotate di un sistema di regolazione che permette loro di fermarsi o adattarsi alla corrente ventosa qualora fosse estremamente irregolare o intensa, con il rischio di danneggiare la struttura irreparabilmente.

Esistono due sistemi per regolare la turbina:

- regolazione per stallo;

- variazione del passo palare.

La *regolazione per stallo* è la più semplice e la più usata per impianti di piccole dimensioni. Consiste nel mantenere fissi sia la posizione sia la velocità di rotazione delle pale. La forma delle pale viene disegnata in modo tale da creare uno stallo progressivo dalla radice fino alla punta dell'ala. Lo stallo è un repentino calo di portanza. In condizioni di stallo il rotore non produce più portanza ottenendo una curva di potenza piatta dopo il superamento della velocità nominale. Questo si ottiene in fase di progettazione dimensionando la macchina eolica quindi pale e generatore elettrico per la massima potenza che risulta dal coefficiente di potenza rotorico. Molto semplicemente si calettano le ali sul mozzo ad un angolo di attacco tale che superata una certa velocità del vento v , queste smettano di produrre portanza.

Questa regolazione pur essendo semplice ed economica non permette al generatore di sfruttare la disponibilità di energia che il vento possiede ad elevate velocità.

Tale sistema di regolazione in assenza di interventi esterni si dice passivo.

Il secondo sistema a *variazione del passo palare* è decisamente più efficace del primo. Difatti un meccanismo di regolazione comandato elettronicamente permette alle singole pale di cambiare calettamento, ovvero l'inclinazione lungo il loro asse principale, adattandosi alle diverse velocità, variando quindi la geometria della macchina. Tale sistema si dice attivo. Qualora in vento mettesse in pericolo la stabilità della struttura questo sistema di regolazione permette alla pale di collocarsi in “posizione di bandiera”, cioè con il bordo di attacco frontale alla direzione del vento.

Essendo un sistema di regolazione piuttosto complesso viene installato su turbine eoliche di grande dimensioni.

Naturalmente tutti questi sistemi di regolazione aggiuntivi comportano un maggior peso e una maggior probabilità di rottura che aumenta proporzionalmente al numero di componenti installate.

Tutte le parti in movimento sono collocate nella navicella in cima alla torre ed in caso di malfunzionamento, o più semplicemente di manutenzione ordinaria, diventa difficile andare ad intervenire tempestivamente. Occorre inoltre personale specializzato in lavori in quota con un'adeguata attrezzatura, comportando un aumento dei costi di gestione/ manutenzione.

Ma è soprattutto per installazioni “artigianali” l'altezza rappresenta un ostacolo ed un pericolo, in quanto un manutentore inesperto e con un'attrezzatura insufficiente (vedi scale, corde di sicurezza, cinture porta attrezzi) si trova impacciato nei lavori alle quote del rotore, per piccoli impianti 10 metri, aumentando il rischio di caduta e di infortunio.

Un ulteriore svantaggio dato dall'altezza della torre è l'installazione dell'impianto stesso che necessita di idonei mezzi in grado di sollevare le parti in quota dell'aerogeneratore. È necessaria anche la presenza di fondazioni alla base della torre che garantiscano la stabilità e che siano resistenti alle infiltrazioni.



49. *Passaggio delle pale di una turbina in un'area abitata.*

Nel caso di impianti di dimensioni notevoli un ulteriore vincolo è dato dal trasporto delle varie parti della turbina, in molti casi si devono costruire appositamente strade per permettere il passaggio dei camion. Per questo tipo di costruzioni il costo del trasporto può arrivare al 20% del costo totale dell'impianto.

Per impianti di piccole dimensioni, ed in caso di auto-costruzione, la realizzazione, il trasporto ed ancora più a monte l'approvvigionamento di strutture idonee a sopportare le sollecitazioni di questo tipo di rotori diventa problematico.

Un ulteriore svantaggio è rappresentato dalla possibile interferenza coi radar e con i ponti radio, questi ultimi estremamente utilizzati nelle comunicazioni in zone isolate.

Non bisogna dimenticare che una costruzione di altezza notevole è visibile da molto lontano e in alcuni contesti paesaggistici diventa improponibile l'installazione anche di una singola turbina.

Aumentando le dimensioni aumentano conseguentemente i problemi sopraesposti. Per questo motivo in molte località diventa estremamente conveniente installare turbine eoliche di dimensioni ridotte.

In sintesi i vantaggi sono rappresentati da:

- C_p alti;
- possibilità di lavorare con venti più puliti e di conseguenza con densità energetica maggiore;

- velocità di rotazione basse;
- diffusa presenza sul mercato.

Gli svantaggi invece sono dati da:

- altezza della torre;
- difficoltà di installazione e manutenzione;
- necessità di fondazioni;
- costi elevati nel trasporto;
- necessità di lavorare sempre con vento frontale al rotore
- interferenza con radar ed onde radio;
- difficile inserimento in alcuni contesti paesaggistici.

9.2.2 Turbine eoliche ad asse verticale (VAWT).

Le turbine eoliche ad asse verticale hanno l'asse di rotazione posto verticalmente.

Questo tipo di aerogeneratori sono stati pensati e realizzati fino dagli inizi del '900, in particolare dal 1920 in poi.

Il grosso vantaggio di questa tecnologia è la capacità di lavorare con venti provenienti da ogni direzione, come illustrato nella figura successiva.



50. Turbina VAWT (fonte: quietrevolution.com).

Questa classe di turbine si adatta molto bene in località dove la variabilità direzionale del vento è particolarmente spiccata, non avendo bisogno di un sistema di orientamento del rotore.

Un'altra caratteristica che rende particolarmente interessante i rotori ad asse verticale è la quantità ridotta di parti mobili, che si traduce in una notevole resistenza a raffiche di vento di intensità elevata.

La macchina semplice si compone di:

- rotore;
- torre;
- moltiplicatore di giri.

Rispetto ai rotori ad asse orizzontale, i VAWT presentano il notevole vantaggio di avere tutta l'attrezzatura meccanica e di controllo al suolo, permettendo così una facile installazione ed una altrettanto facile manutenzione. Ulteriore vantaggio è dato dall'altezza ridotta dell'impianto e di conseguenza la richiesta di torri meno onerose dal punto di vista economico e progettuale.

L'auto-costruzione di turbine ad asse verticale è decisamente meno costosa e più semplice da realizzare rispetto agli aerogeneratori tradizionali ad asse orizzontale, richiedendo risorse e tecnologie meno sviluppate.

L'intensità del vento a livello del suolo è più bassa rispetto alla velocità della stessa corrente ventosa in quota e contestualmente l'intensità di turbolenza risulta essere più elevata. Tutto ciò si traduce in minor energia disponibile per essere trasformata dal rotore in potenza disponibile all'albero di rotazione.

Le turbolenze indotte dal suolo, per quanto basse possano essere, creano vibrazioni non trascurabili all'aerogeneratore. Queste vibrazioni andranno ad interessare tutto ciò che è legato all'albero di rotazione, quindi moltiplicatore di giri, alternatore e fondazioni, richiedendo una manutenzione periodica ed accurata soprattutto per i cuscinetti a sfera.

La minore efficienza rispetto alla tecnologia ad asse orizzontale ne ha limitato di molto la diffusione. L'ottimizzazione di queste macchine e la loro propensione a lavorare anche con venti deboli inferiori a 4 m/s e turbolenti, permette un tempo di funzionamento maggiore rispetto alle HAWT, andando a coprire una fascia molto consistente di ore di vento/giorno.

Le turbine eoliche ad asse verticale possono lavorare sia a portanza che a resistenza. I due principali rotori ad asse verticale sono:

- rotore *Savonius* a resistenza;
- rotore *Darrieus* a portanza.

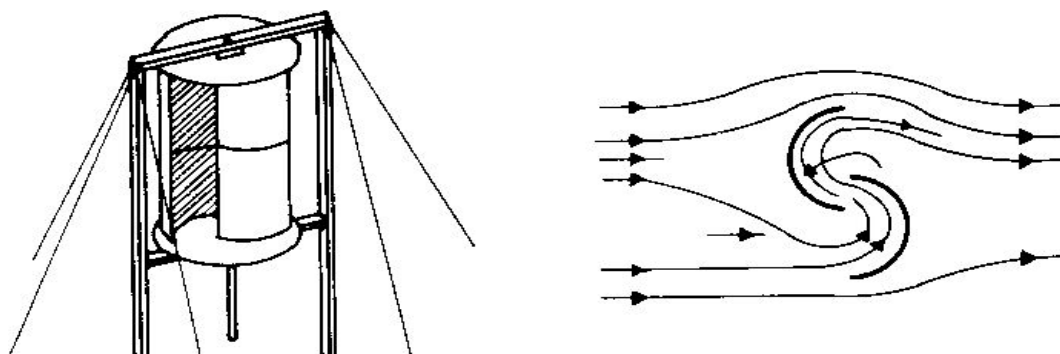
9.2.2.1 Rotore Savonius.

Questo genere di rotori ad asse verticale ha la particolarità di lavorare per resistenza, e sono in grado di convertire la potenza estratta dal vento in coppia da trasferire ad un albero.

Sono stati inventati dall'ingegnere finlandese Sigurd J. Savonius nel 1922.

E' decisamente la tipologia di macchina eolica più semplice da replicare anche artigianalmente essendo costituita da due superfici semi-cilindriche fissate tra due piatti in

modo da comporre una “S”. Le superfici semi-cilindriche possono essere realizzate mediante il taglio longitudinale di bidoni da 50 fino a 200 litri.



51. Rotore Savonius.

Questa macchina ha una notevole coppia di spunto che le permette un avviamento a venti tra il I e II grado della scala Beaufort, oltre a presentare il vantaggio di non aver bisogno di un sistema di orientamento.

I rotori Savonius hanno un'efficienza massima del 25% a λ 0,8, il che li rende poco efficaci per la produzione di energia elettrica, ma estremamente utili nel pompaggio di piccole portate di acqua da un pozzo.

Un ulteriore vantaggio è rappresentato dal costo di realizzazione che si può considerare pressoché nullo se viene realizzato artigianalmente mediante l'utilizzo di un normalissimo bidone metallico o plastico di recupero tagliato in due.

Gli aspetti negativi sono un drastico crollo del rendimento in caso di venti forti ed una scarsa resistenza strutturale ad essi.

Il crollo del rendimento è causato dalla geometria stessa del rotore: difatti mentre una pala si muove nel flusso, l'altra si muoverà contro la direzione del vento. Questo impedisce ai rotori Savonius di avere una velocità di rotazione maggiore a quella del vento e di conseguenza $\lambda > 1$, potendo così migliorare il C_p e l'efficienza.

Esistono tuttavia Savonius modificati che raggiungono $\lambda = 1,2$.

Per avere maggior rendimento si possono avere più rotori Savonius sovrapposti o un semplice rotore composto da più pale.

I rotori a resistenza Savonius sono spesso usati per fornire la coppia di spunto a rotori a portanza più grandi e difficilmente auto-avviabili come i Darrieus.



52. *Generatore Savonius doppio auto-costruito.*

9.2.2.2 Rotore Darrieus.

Il rotore Darrieus è una turbina ad asse verticale in grado di lavorare per portanza. Il suo disegno è stato inventato da Georges Jean Marie Darrieus, un ingegnere aeronautico francese, nel 1931.

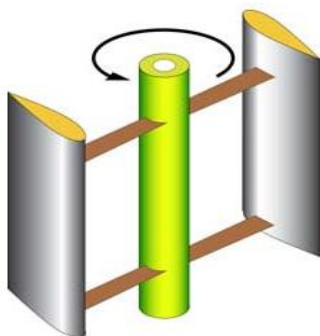
Inizialmente non ebbe molto successo ma a partire dagli anni '70 alcuni ricercatori canadesi del National Research Council ripresero il progetto, migliorandolo ed ottimizzandolo. Grazie a questi studi e ai conseguenti miglioramenti anche il rotore Darrieus divenne conveniente dal punto di vista economico, tanto da venir usato in alcune wind farm californiane.



53. *Turbina Darrieus da 4MW nel parco eolico di Gaspé Peninsula, Quebec, Canada.*

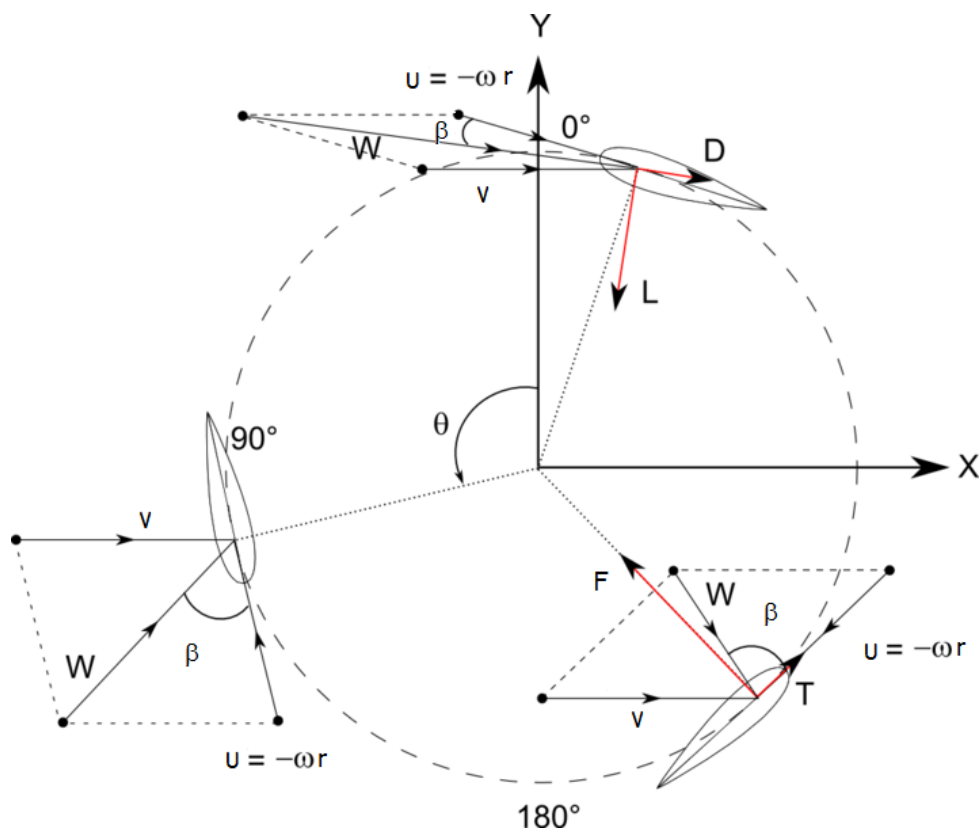
Al momento la turbina più grande costruita è in grado di produrre 4 MW, raggiunge i 110 m di altezza ed è situata nella penisola Gaspé, in Quebec, Canada. Generalmente queste turbine vengono usate per la produzione di energia elettrica, da qualche decina a qualche centinaia di kW.

Come tutti gli aerogeneratori ad asse verticale non necessita di una direzione prevalente del vento per poter funzionare.



54. Sezione di una turbina Darrieus (fonte: wikipedia.com).

La macchina è composta da profili alari posti verticalmente con le estremità collegate ad un albero che permette loro di ruotare. Nei classici rotori Darrieus le pale sono due, simmetriche e con angolo di attacco nullo relativo alla struttura sulla quale sono alloggiate.



55. Forze agenti in una turbina Darrieus (fonte wikipedia.com).

Durante la rotazione una pala si muove in direzione opposta a quella del vento, mentre la seconda si muove nella direzione del vento.

La prima genera portanza, in quanto la rotazione crea un angolo di attacco positivo che, come spiegato nel paragrafo “*turbine eoliche a portanza*”, fa variare la velocità del flusso d'aria che investe il profilo, generando a sua volta una differenza di pressione tra dorso e ventre del profilo stesso. La differenza di pressione genera portanza (L) che permette il movimento delle pale attorno all'asse rotazione.

Dalla figura precedente si capisce il principio di funzionamento di una turbina Darrieus.

La variazione dell'angolo di attacco β scaturisce dalla continua variazione della direzione di W , la risultante del vettore velocità, data dalla somma vettoriale della velocità del vento v e della velocità di avanzamento della pala u .

$$37 \quad W = v + u = v + (-\omega \times r) [m/s]$$

La velocità W varia lungo tutta la circonferenza descritta dal movimento del profilo. Essa assume valore massimo quando il profilo si trova in posizione azimutale, data dall'angolo θ , 0° , mentre assume il valore minimo quando si presenta a $\theta = 180^\circ$. In questo punto non genera portanza.

È possibile ricavare W e β lungo tutta la circonferenza dalla seguente formula:

$$38 \quad W = u \sqrt{1 + 2\lambda \cos \theta + \lambda^2} [m/s]$$

$$39 \quad \beta = \arctan\left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta + \lambda}\right)$$

Si può notare come entrambi i parametri siano in funzione della *tip speed ratio* λ , definita dall'equazione 14).

La risultante della forza aerodinamica F si può scomporre in:

- L = portanza generata dal profilo alare (N);
- D = resistenza generata dal profilo alare (N);

oppure in:

- N = forza normale agente sul profilo alare (N);
- T_n = forza tangenziale agente sul profilo alare (N).

Si considera che le forze sopraelencate agiscano ad $\frac{1}{4}$ della corda alare partendo dal bordo d'attacco del profilo.

La forza tangenziale T_n agisce lungo la direzione della velocità palare u , tirando avanti la pala e consentendo la rotazione. La forza normale N agisce in maniera radiale andando ad agire

sull'albero di rotazione e ripercuotendosi sui cuscinetti collegati all'albero.

Ai fini aerodinamici è utile tenere conto di portanza L e resistenza D , ma ai fini meccanici di progettazione della struttura è più corretto tenere in considerazione N e T_n .

Portanza e resistenza sono, come asserito in precedenza, normalizzati tramite i coefficienti adimensionali C_L e C_D che tengono conto della pressione dinamica agente sul profilo alare, mentre forza normale N e tangenziale T sono normalizzati tenendo conto della pressione dinamica del flusso di aria indisturbato.

Abbiamo così:

$$40 \quad C_L = \frac{2L}{\rho S W^2}$$

$$41 \quad C_D = \frac{2D}{\rho S W^2}$$

$$42 \quad C_T = \frac{2T_n}{\rho S v^2}$$

$$43 \quad C_N = \frac{2N}{\rho S v^2}$$

Confrontando la 40) e 41) con la 28) e la 29) ci accorgiamo come nei rotor Darrieus non possiamo non considerare le due componenti di velocità agenti sul profilo, ovvero la componente u data dal movimento del rotore e la componente v data dal vento.

Un grosso vantaggio delle VAWT, e quindi anche delle Darrieus, è quello di avere la componentistica meccanica ed elettronica a terra, il che permette una facile manutenzione in esercizio ed in caso di guasti.

Quando la turbina è ferma non genera forze, nemmeno se il vento che la investe è di intensità rilevante. Le turbine Darrieus non sono quindi auto-avvianti e necessitano di una coppia di spunto per partire, generalmente fornita da rotor Savonius posti in testa alla torre.

Un secondo problema degli aerogeneratori Darrieus è dovuto alla continua variazione dell'angolo di attacco. Difatti le pale generano la coppia massima in due punti del loro ciclo, in posizione azimutale $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 270^\circ$, producendo una pulsazione sinusoidale che complica la progettazione dell'albero e di tutto ciò a cui esso è collegato.

In particolar modo i cuscinetti a sfere risultano essere gli organi più sollecitati ma bisogna tenere in considerazione anche le vibrazioni che si andranno a scaricare sul moltiplicatore di giri e sull'alternatore, oltre che le sollecitazioni a cui dovrà essere sottoposta la struttura che sostiene la turbina. Per minimizzare gli stress a cui sono sottoposti gli organi in movimento è stata introdotta la curvatura delle ali a "guscio d'uovo".

Gli aerogeneratori Darrieus sono in grado di lavorare ad una *tip speed ratio* $4,7 < \lambda < 6,8$ con un valore massimo $\lambda = 6$, paragonabile al valore dei rotori HAWT. Il coefficiente di potenza C_p però non è così alto come nei rotori ad asse orizzontale ma è compreso tra $0,26 < C_p < 0,37$, un valore di tutto rispetto che colloca questa tipologia di turbine tra le più performanti.

Si ha quindi $C_{pmax} = 0,37$ a $\lambda = 6$.

Esistono anche delle varianti ai rotori Darrieus che ne conservano inalterato il principio di funzionamento pur variando la forma.

Le due varianti sono:

- Darrieus multipala, da 3 a 5;
- H - Darrieus.
- H – Darrieus elicoidali.

I rotori *Darrieus multipala* conservano la stessa forma del classico rotore Darrieus a guscio d'uovo e l'aggiunta di pale permette di distribuire in maniera più uniforme la coppia e conseguentemente smorzare gli effetti negativi che si avevano sulla meccanica dell'aerogeneratore.

Gli *H – Darrieus* sono rotori decisamente interessanti realizzati prendendo la sezione centrale dei rotori Darrieus. Le pale non sono chiuse sull'albero di rotazione alle estremità ma si presentano parallele all'asse di rotazione. Questo tipo di aerogeneratori si presta bene all'auto-costruzione in quanto non necessita di particolari competenze dal punto di vista tecnico e nemmeno materiali costosi e difficili da reperire. In funzione di una serie di parametri caratteristici, di cui si parlerà in seguito, la turbina è auto-avviante ed è possibile utilizzarla per la produzione di energia elettrica o per l'estrazione di acqua da pozzi.

In commercio esistono turbine di diverse taglie che vanno da 0,36 kW per i modelli più piccoli, fino a 10 kW per macchine più grandi. Non necessitano di freni.

Gli *H – Darrieus elicoidali* sono l'ultima tipologia di rotori ad asse verticale sviluppata. Le pale sono parallele all'asse di rotazione ma sono inclinate sul piano frontale. Questo permette loro una notevole regolarità nella distribuzione della coppia e consente a tutta la struttura di essere molto efficiente in condizioni di vento turbolento.



56. Da sinistra: rotore Darrieus, Darrieus elicoidale, H-Darrieus Ropatec.

9.2.3 Confronto tra HAWT e VAWT.

I vantaggi delle turbine VAWT sono:

- collocamento al suolo della parte meccanica della turbina;
- velocità di cut-in bassa;
- possibilità di costruzione dove turbine alte sono proibite;
- ridotta necessità di interventi di manutenzione;
- capacità di lavorare con venti da ogni direzione ed irregolari.

Gli svantaggi sono rappresentati da:

- efficienza bassa dovuta ad una pala che ruota controvento;
- captano venti con intensità energetica minore;
- scarsa presenza sul mercato;
- impianti di piccola taglia;
- turbine non auto-avvianti.

	HAWT	VAWT a resistenza	VAWT a portanza
C_p	0,38 ÷ 0,48	0 ÷ 0,16	0,26 ÷ 0,37
λ	3,9 ÷ 6,8	0 ÷ 1,2	4,7 ÷ 6,8
Meccanica	In quota	A terra	A terra
Uso	- Produzione energia elettrica.	- Azionamento sistemi di pompaggio; - forniscono la coppia di spunto ai Darrieus	- Produzione di energia elettrica.
Vantaggi	- possibilità di lavorare con venti più puliti; - velocità di rotazione basse; - alta presenza sul mercato.	- collocamento al suolo della parte meccanica della turbina; - velocità di cut-in bassa; - ridotta necessità di interventi di manutenzione; - capacità di lavorare con venti da ogni direzione ed irregolari; - costo di realizzazione nullo; - alta coppia di spunto.	- collocamento al suolo della parte meccanica della turbina; - velocità di cut-in bassa; - possibilità di costruzione dove turbine alte sono proibite; - ridotta necessità di interventi di manutenzione; - capacità di lavorare con venti da ogni direzione ed irregolari.
Svantaggi	- altezza della torre; - difficoltà di installazione e manutenzione; - necessità di fondazioni; - costi elevati nel trasporto; - necessità di lavorare sempre con vento frontale al rotore; - interferenza con radar ed onde radio; - difficile inserimento paesaggistico.	- drastico crollo del rendimento a venti forti; - basso C _p e λ; - scarsamente indicati per la produzione di energia elettrica; - captano venti di intensità energetica bassa.	- efficienza bassa dovuta ad una pala che ruota controvento; - captano venti con intensità energetica minore; - scarsa presenza sul mercato; - impianti di piccola taglia; - turbine non auto-avvianti.
Autocostruzione	Possibile ma complessa	Molto facile	Discretamente facile
Taglia	Da 1kW a 6 MW	Da 0,1 kW a 1kW	Da 0,3 kW a 1MW

9.3 Classificazione per taglia della turbina.

Per taglia di una turbina si possono intendere due modi differenti di classificarla:

- per dimensione;
- per potenza nominale.

Naturalmente maggiori sono le dimensioni di un aerogeneratore maggiore sarà la sua capacità di produrre energia. Il classificare le turbine per dimensione non sempre è corretto perché negli ultimi anni si è assistito ad un incremento notevole delle prestazioni dei convertitori eolici, ed impianti di dimensioni contenute riescono a produrre la stessa quantità di energia di impianti decisamente più grandi installati qualche anno prima.

La *distinzione per dimensione* è molto utile quando si vanno a classificare turbine HAWT; si hanno dunque turbine di:

- **piccola taglia** con rotore $D < 12$ m;
- **media taglia** con rotore $12 \text{ m} < D < 50$ m;
- **taglia intermedia** con rotore $D \approx 50$ m;
- **grande taglia** con rotore > 60 m.

Attualmente la potenza nominale, e di conseguenza la produzione di energia raffrontata con le dimensioni della turbina è la seguente:

- piccola taglia: $P < 100$ kW;
- media taglia: $100\text{kW} < P < 600$ kW;
- taglia intermedia: $600 \text{ kW} < P < 1000$ kW;
- grande taglia: $P > 1000\text{kW}$.

Naturalmente grazie alla continua evoluzione tecnologica tra qualche anno non avrà più senso questo accoppiamento dimensioni/potenza nominale. Tale elenco ha quindi solo funzione rappresentativa della situazione attuale.

La seconda distinzione sicuramente più appropriata ed in uso attualmente è la *classificazione per potenza nominale*. Essa non dipende dalle dimensioni della turbina ma solo dalla sua capacità di produrre energia. In Italia viene usata questa distinzione per valutare gli incentivi statali qualora si decidesse di installare una turbina eolica. La legge di riferimento in Italia è il D.lgs 133/99.

Il grande vantaggio di questa classificazione sta nel riuscire a racchiudere insieme tutte le tipologie di aerogeneratori basandosi solo sulla potenza nominale.

Secondo questa classificazione gli aerogeneratori si suddividono in:

- **micro eolico** per: $P \leq 20 \text{ kW}$;
- **mini eolico** per: $20 < P \leq 100 \text{ kW}$;
- **grande eolico** per: $100 < P \leq 1,5 \text{ MW}$;
- **multimegawatt** per: $P > 1,5 \text{ MW}$.

È bene usare le due classificazioni in maniera distinta perché ogni turbina è costruita per poter sfruttare un tipo di vento diverso, sia dal punto di vista dell'intensità che della turbolenza. È possibile quindi che aerogeneratori con uguale diametro non abbiano la stessa potenza nominale e viceversa, oppure appartengano a tipologie completamente differenti dal punto di vista costruttivo e del funzionamento.

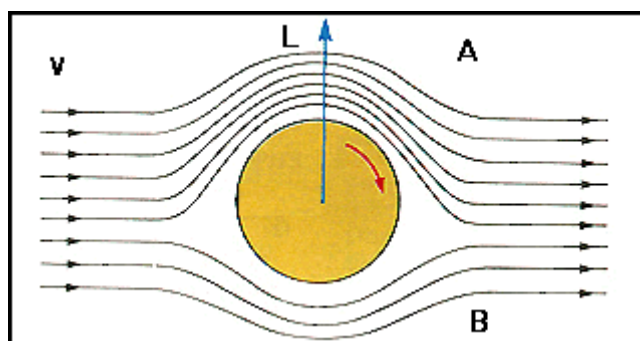
9.4 Rotori alternativi.

Esistono anche dei rotor alternativi oltre a quelli classici presenti in commercio. In questa trattazione prenderemo in esame brevemente quattro tipologie alternative di aerogeneratore:

- ad effetto Magnus;
- Super generatore;
- Kitegen;
- Twind Technology.

9.4.1 Ad effetto Magnus.

Questi rotor sono composti da un cilindro che ruota sul suo asse principale.



57. Rappresentazione effetto Magnus.

Un corpo rotante quando è immerso in un fluido, nel nostro caso aria, genera una forza normale al fluido stesso. È esattamente il fenomeno della portanza che si realizza nei profili alari; il fluido che scorre nella parte A del cilindro ha una velocità maggiore del fluido che scorre nella parte B.

Per il principio di Bernoulli la differenza di velocità crea una differenza di pressione dando luogo alla portanza L .

La formula matematica rappresentativa della portanza generata è la formula di Kutta-Joukowski semplificata, cioè senza tener conto della viscosità dell'aria:

$$44 \quad L = \rho v \Gamma 2 \pi r [N]$$

dove:

r raggio del rotore (m);

Γ circuitazione, ovvero l'intensità dei vortici.

$$45 \quad \Gamma = 2 \pi r^2 \omega$$

Attualmente esistono pochissimi generatori ad effetto Magnus in funzione.



58. Rotore ad effetto Magnus.

Nel forum di www.energeticambiente.it si riporta la notizia che “il CNR sta studiando un generatore Magnus ad asse verticale che genera 75 KW dalla velocità di 5 m/s del vento in poi e comincia a produrre corrente già a 2m/s, ha un rendimento che raffrontato con quelli tradizionali è 1,5 volte (circa)”.

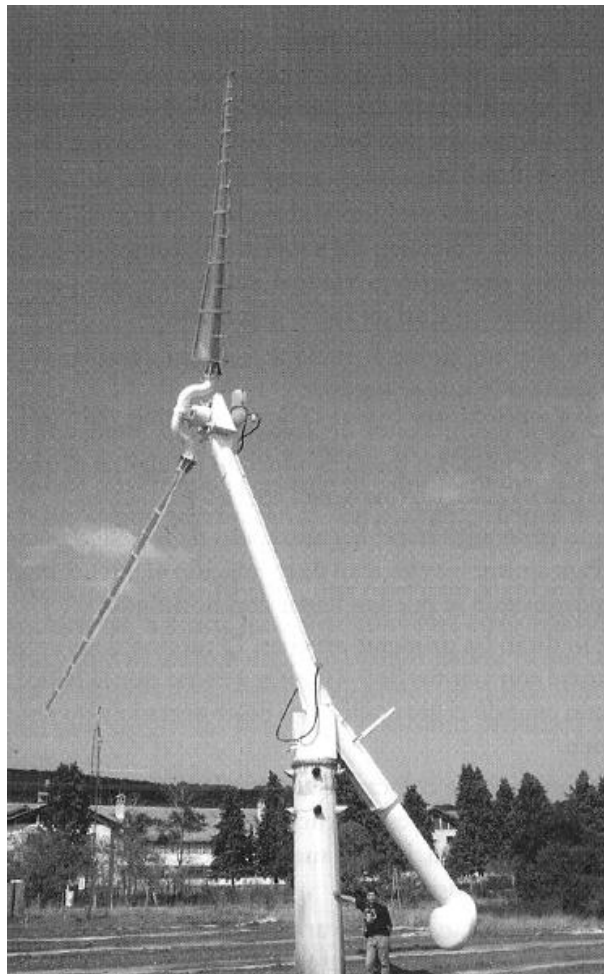


59. Nave Alcyone 2, Cousteau.

L'effetto Magnus è sfruttato attualmente per la propulsione di navi Flettern e Cousteau.

9.4.2 Super generatore.

Si tratta di una turbina che lavora spalle al vento di grandi dimensioni, auto-orientabile senza bandieruola. La sua peculiarità sta nel sistema innovativo di regolazione tramite l'abbattimento manuale o automatico della torre in presenza di venti forti.



60. Super generatore.

É un aerogeneratore molto sicuro e robusto, facile da montare. Le pale sono costruite in legno-tela o pale vuote in lamiera d'alluminio che possono raggiungere il diametro di 4÷5 m. L'impresa che si occupa della realizzazione di questa turbina è la spagnola Ades di Zaragoza y Ebro Cantabrica de Energias Renovables.

Questo tipo di mulino a vento è anche destinato all'auto-costruzione partendo da componenti di vecchie automobili.

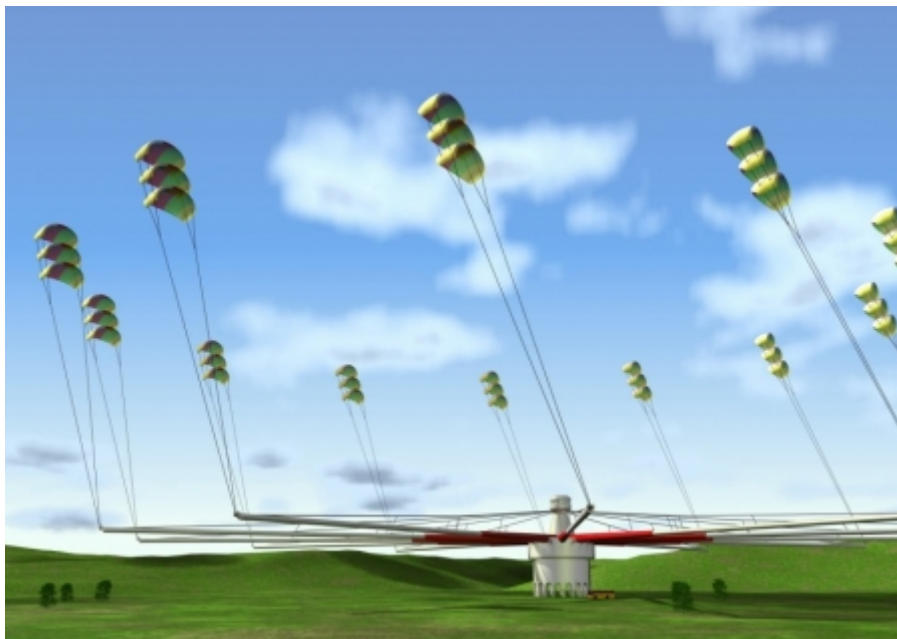
9.4.3 Kitegen, eolico d'alta quota.¹¹

Questa tecnologia espressamente italiana si propone di lavorare con venti ad alta quota. Il Kitegen è una turbina ad asse verticale a cui sono collegati mediante cavi dei profili alari ad alta potenza. Il principio di sfruttamento del vento è identico a quello sfruttato dai kitesurfer per compiere le loro evoluzioni.

I profili alari volano secondo traiettorie ben definite ed il loro movimento genera una coppia trasmessa al generatore. La lunghezza del cavo può arrivare fino a 500 m permettendo ai profili di lavorare ad alta quota intercettando venti molto forti e soprattutto costanti in direzione ed intensità.

I costruttori stimano che si può arrivare ad un diametro della turbina di 1600 m, diametro inteso come massima estensione dei cavi, e che ruotando a 15 giri/h sia in grado di produrre la potenza nominale di 1 GW.

Un problema non indifferente riguarda la richiesta di spazio di questo tipo di aerogeneratori che nei casi più estremi può raggiungere 1 km³.



61. Simulazione di generatore eolico Kitegen.

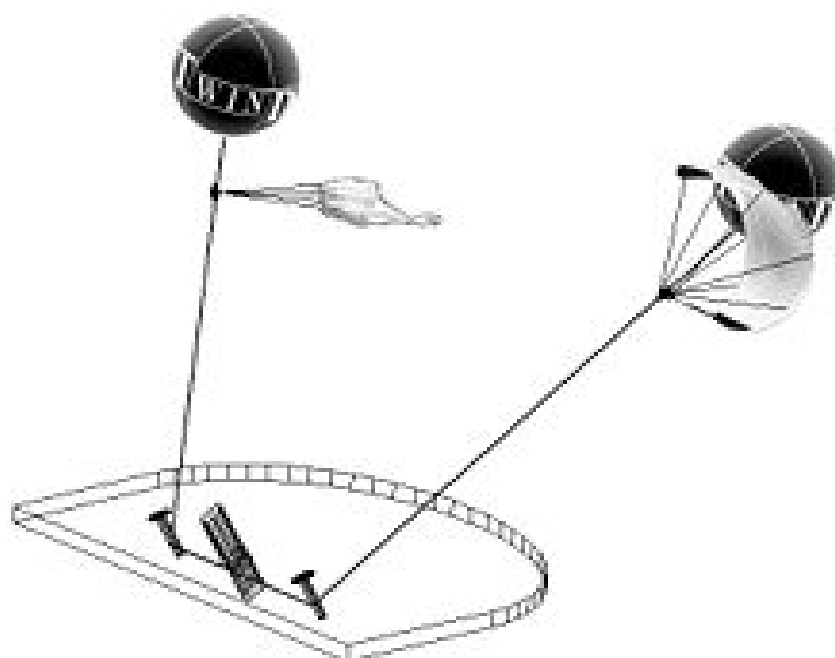
¹¹ Fonte: www.kitegen.com

9.4.4 Twind Technology.

Anche questa tecnologia si basa sullo sfruttamento di venti ad alta quota in questo caso tramite l'utilizzo di una coppia di palloni aerostatici a quote superiori agli 800 m. I cavi sono frenati a terra e fungono da elementi di trasmissione del moto.

Il primo pallone aerostatico, a cui è collegata una vela, viene trascinato orizzontalmente dalla forza vento che insiste sulla sua vela. Il secondo pallone con la vela chiusa viene trascinato dall'altro riportandosi sulla verticale della piattaforma. Quando il secondo pallone giunge a fine corsa un meccanismo automatico permette alla vela del primo pallone di chiudersi ed alla vela del secondo di aprirsi replicando in questo modo il movimento del primo pallone.

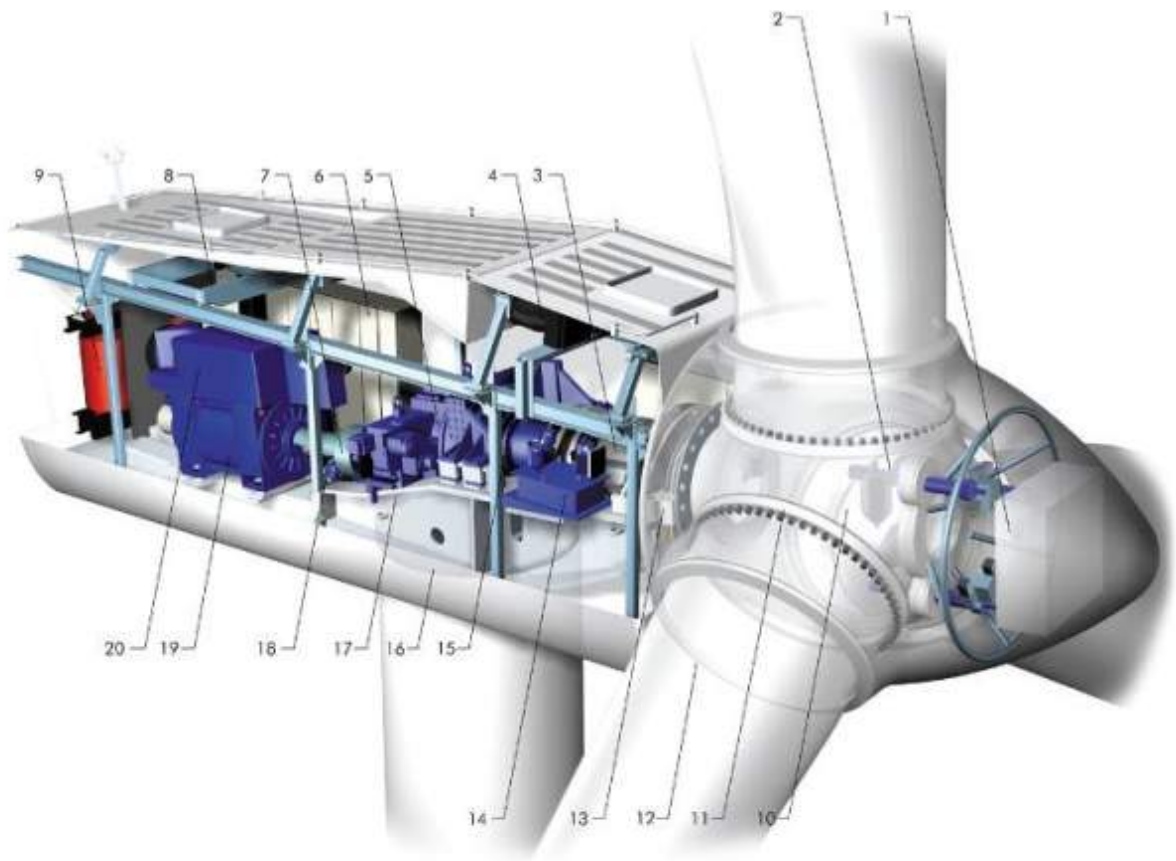
La produzione di energia elettrica avviene tramite il continuo movimento alternativo del cavo che collega i due palloni aerostatici.



62. Generatore Twind Technology.

10 COMPONENTI DI UN AEROGENERATORE EOLICO.

Una turbina eolica, indipendentemente dalla tipologia, è composta da un rotore fissato su di un mozzo, che a sua volta è fissato su una torre. Dal mozzo parte un albero che ruota con la stessa ω del rotore. Il primo albero di rotazione è in collegamento con il moltiplicatore di giri, che ha lo scopo di amplificare in numero di giri dell'albero principale. Dal moltiplicatore di giri parte un secondo albero che fa muovere il generatore elettrico. Quest'ultimo può essere collegato o meno alla rete elettrica.



63. Sezione e componenti di una HAWT.

Dove:

1	controllo del mozzo;	7	freno;
2	controllo del beccheggio;	8	gru di servizio;
3	albero principale;	9	trasformatore;
4	raffreddamento ad olio;	10	mozzo delle pale;
5	trasmissione;	11	cuscinetto delle pale;
6	controllo principale;	12	pala;

13	sistema di bloccaggio del rotore;	17	supporto della macchina;
14	unità idraulica;	18	trasmissione d'imbardata;
15	disco di restringimento idraulico;	19	generatore Optispeed;
16	anello d'imbardata;	20	raffreddamento del generatore.

Andiamo ora ad analizzare nel dettaglio le varie parti di cui si compone una turbina eolica.

10.1 Rotore.

Nel capitolo precedente abbiamo visto come i rotori possano essere classificati in base all'orientamento e al principio di funzionamento.

Il rotore ha il compito, attraverso le pale, di trasformare l'energia insita nel vento in energia meccanica od elettrica.

Il rotore è composto da pale che possono lavorare per portanza o per resistenza.

Una buona progettazione del rotore in funzione della risorsa eolica è di fondamentale importanza per evitare sprechi di materiale e di denaro. La progettazione deve ovviamente tenere conto delle turbolenze a cui le pale sono sottoposte, scegliendo opportunamente i materiali.

Le sollecitazioni più frequenti alle quali sono sottoposti i rotore sono sicuramente le sollecitazioni a fatica in quanto una turbina eolica, se ben progettata, può funzionare 7000 h/anno.

Nella definizione di un rotore si deve far fronte a una serie di compromessi. Il primo riguarda la leggerezza delle pale, che devono essere leggere per evitare stress eccessivi e per disperdere meno energia in fase di avvio. Difatti è molto più facile vincere l'inerzia iniziale di una turbina leggera rispetto a quella di una turbina con pale pesanti. Di contro una turbina leggera tenderà a fermarsi prima di una pesante che invece avrà un effetto volano molto spiccato, sempre per via dell'inerzia del corpo.

Un rotore pesante sarà normalemte più robusto e più rigido rispetto ad uno leggero ma ad un aumento notevole di peso corrispondono una serie di problemi legati al trasporto e all'installazione. Variando tipologia di turbine variano anche le esigenze da questo punto di vista; per turbine HAWT è impensabile andare oltre un certo peso, in quanto il rotore è posizionato talvolta a quote molto elevate. Da non sottovalutare anche la velocità periferica delle pale che aumenta di molto i rischi di rottura o danneggiamento del rotore.

Per le VAWT il problema del peso diventa meno rilevante perché non raggiungono le altezze delle turbine ad asse orizzontale ed inoltre il peso si scarica verticalmente sulla torre. L'altezza del rotore non raggiunge mai quote elevate in quanto resta sempre nell'ordine dei 20-30 m ed

inoltre i valori di λ sono bassi, a parte turbine Darrieus particolarmente efficienti.

Un altro fattore influenzato dal peso riguarda sicuramente i costi di produzione. Maggior quantità di materiale richiede costi maggiori. Questi problemi, tipici anche dell'industria aeronautica, hanno fatto propendere i costruttori di turbine eoliche verso nuovi materiali che offrono, a parità di costi del pezzo finito, maggior leggerezza e maggior resistenza.

Esclusi magnesio e titanio per via dei costi e l'acciaio per via del peso i materiali usati per costruzione ed auto-costruzione di un rotore sono:

- Alluminio;
- Materiali compositi;
- Legname e tela

MATERIALE	VANTAGGI	SVANTAGGI
Alluminio	- alto rapporto resistenza/peso; - ampia scelta di leghe; - facilità di lavorazione; - disponibile in molte forme standard.	- sensibile alla corrosione; - bassa resistenza alle alte temperature; - cattivo comportamento a fatica; - propensione alla deformazione sotto sforzo.
Legname e tela	- elasticità; - basso peso specifico; - facilità di lavorazione; - costi; - facilità di riparazione e sostituzione; - assorbimento e smorzamento vibrazioni; - reperibilità.	- volumi elevati a parità di utilizzo rispetto alluminio e acciai; - variabilità caratteristiche a seconda del legname; - solo trattamenti superficiali con vernici; - bassa resistenza agli urti.
COMPOSITI: FIBRE		
Fibre di vetro	- basso costo; - bassa densità; - rigidità; - resistenza chimica.	- irritabilità della cute a contatto con le fibre.

MATERIALE	VANTAGGI	SVANTAGGI
Fibre di carbonio	- basso peso specifico; - basso coefficiente di dilatazione termica; - alta resistenza specifica; - alta rigidità specifica.	- costi; - presenza di un'autoclave; - difficoltà nella lavorazione.
COMPOSITI: MATRICI		
Resine epossidiche	- ottima adesione alle fibre; - buona resistenza chimica; - stabilità termica; - bassi valori di sollecitazione residua.	- vapori; - in fase di solidificazione necessita di temperatura costante.
Poliestere	- ottima unione con fibre di vetro; - basso costo; - breve tempo di polimerizzazione; - buone caratteristiche meccaniche.	- vapori.

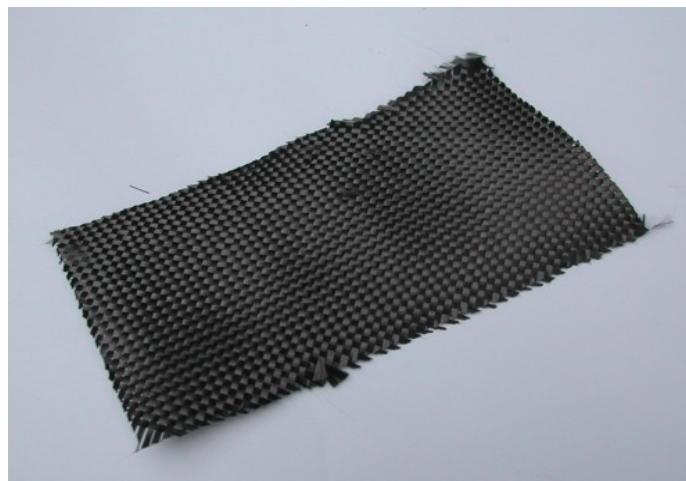
9

Confronto fra diversi materiali.

I materiali compositi sono costituiti da *fibra* e *matrice*.

La *fibra* è il corpo solido di forma allungata, nello specifico fili che si intrecciano in una maglia, che fornisce al composito le sue caratteristiche di resistenza e rigidità meccanica.

La *matrice* agisce da collante tra le fibre oltre a riempirne gli spazi vuoti. È in forma liquida molto viscosa ed una volta seccata diventa dura, andando a definire la forma spaziale dell'oggetto da costruire, in questo caso le pale del rotore. La matrice ha il compito di trasferire e distribuire gli sforzi sulle fibre.



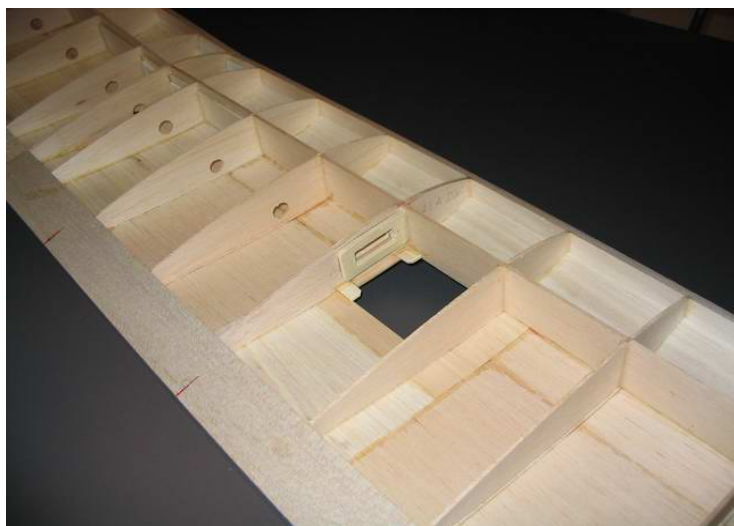
64. *Maglia in fibra di carbonio.*

Nella costruzione di pale in composito si procede in questo modo:

una volta definita la forma della pala si preparano due stampi che ricalcano il dorso ed il ventre della pala. All'interno dello stampo viene posizionata la fibra ed orientata in modo che sopporti i carichi a cui deve lavorare. La geometria delle fibre è fondamentale perché fibre male orientate provocherebbero un collasso della struttura sottoposta a carichi. Ad ogni strato di fibra si aggiunge uno strato di resina fino a raggiungere lo spessore richiesto dal progettista. Con alcune tipologie di fibre è necessario il passaggio in autoclave.

I rotori di grandi e piccole dimensioni prodotti industrialmente sono costruiti tutti in composito, che abbina leggerezza e resistenza meccanica. Lo sviluppo di questi materiali ha contribuito notevolmente ad abbassare il peso permettendo di aumentare le dimensioni. Un esempio citato in Pirazzi et al., 2004, è quello di una pala Vestas WD34 da 16,5m costruita a metà degli anni '90 con un peso di 1500kg, lo stesso peso che nel 2004 raggiunge una pala V47 da 23m.

Occorrono però strumenti ed attrezzature idonee per lavorare questo tipo di materiale, il che lo rende sconsigliabile per chi volesse cimentarsi nell'auto-costruzione di un rotore artigianale. Il materiale più semplice da lavorare in caso di auto-costruzione è il legno, ma anche l'alluminio si presta molto bene a questo tipo di realizzazione.



65. Pala in legno.

Il collegamento con l'albero di rotazione avviene mediante un mozzo negli HAWT, mediante collegamento diretto nei Savonius e Darrieus, e mediante bracci nell'H-Darrieus.

I collegamenti sono generalmente costruiti mediante fusione in acciaio, in quanto devono sopportare sollecitazioni notevoli.

Le funzioni del mozzo, oltre a quelle di collegamento, sono funzioni di regolazione del passo pale e della posizione di stallo delle pale.

Il costo del rotore è approssimativamente il 20% del costo totale dell'aerogeneratore.

10.2 Moltiplicatore di giri.

Per poter utilizzare l'energia del vento estratta dal rotore è necessario l'accoppiamento con un moltiplicatore di giri. Il rotore produce alta coppia ad un basso numero di giri ed il generatore elettrico, o i meccanismi che si vogliono azionare col movimento dell'albero principale, hanno bisogno di un alto numero di giri per poter funzionare.

In alcune turbine può svolgere la funzione di sostegno dell'albero, come nel caso di VAWT, mentre nelle HAWT il moltiplicatore è alloggiato nella gondola dove avrà un apposito sostegno opportunamente dimensionato.

Andremo ad analizzare:

- scatola d'ingranaggi;
- cinghia-puleggia;
- catene.

10.2.1 Scatola d'ingranaggi.

È il moltiplicatore di giri usato per le turbine eoliche commerciali a partire dal micro-eolico fino alle multi megaWatt, in quanto consente rapporti di moltiplicazione molto differenti oltre ad essere estremamente affidabile e compatto.

Questo moltiplicatore di giri è composto da ingranaggi che hanno il compito di amplificare e trasmettere il moto al generatore. Gli ingranaggi possono essere cilindrici, conici, elicoidali.

L'ingranaggio che trasmette il moto è detto *ruota conduttrice*, quello che lo riceve è detto *ruota condotta*.

Il parametro fondamentale per valutare e dimensionare un moltiplicatore di giri è il *rapporto di trasmissione* definito come:

$$46 \quad \tau = \frac{\omega_1}{\omega_2}$$

dove:

- ω_1 velocità angolare ruota conduttrice (rad/s);
- ω_2 velocità angolare ruota condotta (rad/s).

Nel caso del moltiplicatore di giri $\tau < 1$.

La ruota condotta girerà più velocemente della conduttrice ma con meno coppia.

Nel caso non si riesca a misurare la velocità angolare è possibile fare ricorso al rapporto tra raggi della ruota conduttrice (r_1) e la ruota condotta (r_2):

$$47 \quad \tau = \frac{r_1}{r_2}$$

È molto importante dimensionare correttamente gli ingranaggi perché lavoreranno per svariate migliaia di ore all'anno.

Il moltiplicatore di giri, oltre alle pale, è una delle due fonti principali di rumore di una macchina eolica.

Nel caso di turbina eolica auto-costruita è possibile usare dei cambi o dei differenziali di vecchie automobili opportunamente revisionati.



66. Sistema di trasmissione ad ingranaggi.

10.2.2 Cinghia-puleggia.

Viene usata solo in caso di auto-costruzione della turbina, visto che il sistema ad ingranaggi è sicuramente più resistente e meno ingombrante del sistema a cinghia.

Questo sistema di trasmissione è attuale nell'auto-costruzione perché è di facile installazione, economico ed il materiale è reperibile in tutte le misure. Inoltre quasi tutti i generatori elettrici hanno incorporata una puleggia. Ulteriore vantaggio è dato dalla sua poca richiesta di

manutenzione, inoltre è resistente all'acqua oltre ad essere molto silenziosa.

Un problema è rappresentato dallo slittamento in fase di avviamento.

La cinghia è messa in movimento da pulegge, ed anche per il sistema cinghia-puleggia vale il rapporto di trasmissione τ .

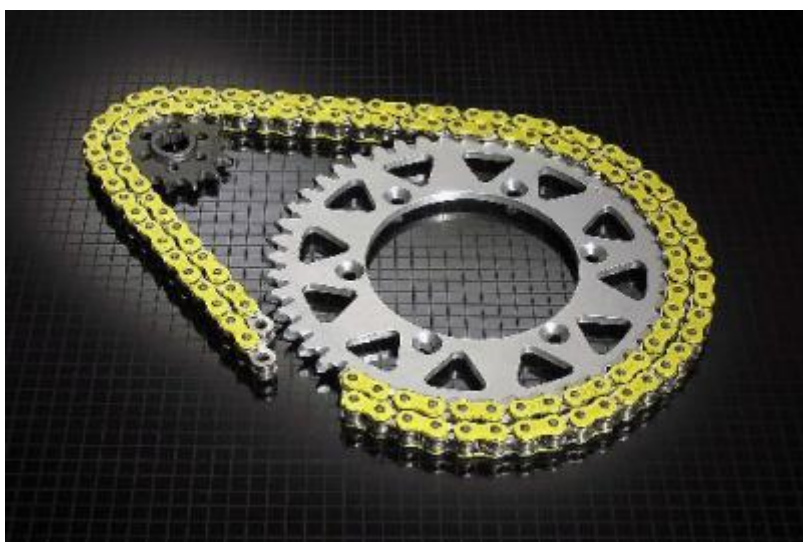


67. Sistema di trasmissione cinghia-puleggia.

10.2.3 Catene.

È il sistema meno usato per l'auto-costruzione. È composto da una *catena*, formata a sua volta da anelli, che trasmette il moto da un *pignone* (l'ingranaggio più piccolo) ad una *corona* (l'ingranaggio più grande).

Le catene sono usate per rapporti di trasmissione non molto alti, in genere da 1:2 a 1:4. Offrono il grande vantaggio di avere resistenze minime e di conseguenza avere rendimenti alti. Vengono usate per generatori fino a 500 W .



68. Catena, corona e pignone.

Il loro problema principale è quello di necessitare di una costante ed attenta manutenzione, in quanto devono essere sempre ben oliate e pulite, oltre a dover essere protette dalla pioggia,

perché potrebbero arrugginirsi facilmente.

Inoltre sono abbastanza rumorose e si incorre sempre nell'inconveniente che la catena “salti”, cioè non sia più sul pignone o sulla catena.

10.3 Generatore.

È sicuramente una delle componenti indispensabili alla turbina nel caso si voglia produrre energia elettrica. È infatti nel generatore che l'energia meccanica si trasforma in energia elettrica.

I primi generatori utilizzati erano semplicemente motori elettrici convenzionali usati come generatori.

I generatori sono composti da un rotore collegato tramite un albero alle pale eoliche, ed uno statore collegato alla rete o all'accumulatore.

Possono produrre:

- corrente continua;
- corrente alternata.

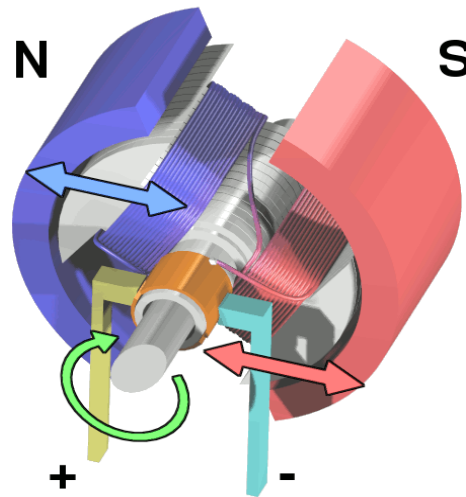
10.3.1 Generatori in corrente continua.

L'unico generatore in corrente continua usato per convertire l'energia cinetica dei rotori eolici in energia elettrica è la *dinamo*. È formata da una parte fissa detta statore ed una parte mobile detta rotore. Costruttivamente è identica ad un motore in corrente continua.

La dinamo consiste di una spira conduttrice (rotore) immersa in un campo magnetico, generato ad esempio da una coppia di magneti permanenti, che formano lo statore. La spira è messa in rotazione dall'albero collegato al rotore della turbina eolica. Per la legge di Faraday un conduttore che si muove in un campo magnetico (purché non parallelamente ad esso) vede nascere una forza elettromotrice indotta; chiudendo quindi la spira su un carico elettrico (ad esempio una lampadina) abbiamo lo scorrere di una corrente elettrica.

La corrente elettrica fuoriesce dalle spazzole. Una parte di questa corrente la si fa passare attraverso gli avvolgimenti induttori per mantenere sempre costante il campo magnetico se i magneti non sono permanenti.

Un limite delle dinamo, ed in generale dei motori a spazzole, è la presenza appunto delle spazzole che essendo in grafite si consumano. Un ulteriore limite derivante dall'utilizzo di spazzole è la formazione di scintille a velocità alte. Inoltre se la dinamo è di grandi dimensioni si hanno sicuramente dei problemi di smaltimento del calore, perché gli avvolgimenti si scaldano per effetto Joule.



69. Schema esemplificativo di una dinamo (fonte: wikipedia.com).

Con il miglioramento della tecnologia riguardo ai generatori elettrici le dinamo trovano ormai spazio solo nell'auto-costruzione, mentre attualmente si ricorre ai generatori Brushless (senza spazzole) a magneti permanenti.

Il motore Brushless non ha bisogno delle spazzole poiché l'inversione del campo magnetico non avviene più meccanicamente ma elettronicamente tramite un banco di transistor.

Questi generatori sviluppano molto meno calore rispetto alle dinamo oltre a dover ricorrere alla manutenzione ad intervalli più lunghi. È totale la mancanza di scintille.

L'unico grosso svantaggio è rappresentato dal maggiore costo.

10.3.2 **Generatori in corrente alternata.**

I generatori che lavorano in corrente alternata sono di due tipologie:

- generatori sincroni;
- generatori asincroni.

10.3.2.1 **Generatori sincroni.**

Tutti i generatori e i motori trifase usano un campo magnetico rotante. È costituito da uno statore sul quale sono presenti gli avvolgimenti ed un rotore solidale all'albero di rotazione su cui sono presenti diversi poli magnetici di polarità alternata. Questa polarità è data da elettromagneti che lavorano in corrente continua.

Quando il rotore del generatore gira per effetto della rotazione delle pale eoliche si genera una corrente alternata che può essere immessa in rete. Maggiore forza si applica maggiore sarà la

produzione di elettricità del generatore.

Il generatore sincrono però dovrà lavorare ad una velocità prestabilita in quanto la sua frequenza di funzionamento deve essere identica a quella della rete elettrica (in Italia 50 Hz).

I generatori asincroni non sono molto usati perché i magneti permanenti tendono a smagnetizzarsi lavorando nel campo elettrico all'interno del generatore. Inoltre è richiesta una velocità di rotazione stabile e precisa poiché se viene frenata o accelerata oltre un certo limite si innescano una serie di oscillazioni che possono causare sovracorrenti così elevate da poter danneggiare il generatore.

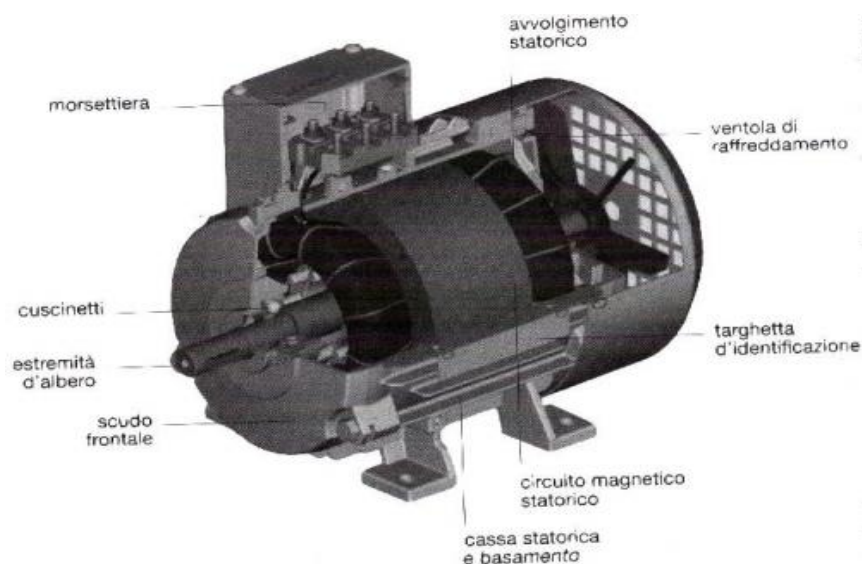
Questo tipo di generatori si usa per turbine senza moltiplicatore di giri abbinando un convertitore di frequenza. Il numero dei poli generalmente è alto.

10.3.2.2 *Generatori asincroni.*

La quasi totalità delle turbine eoliche utilizza i generatori asincroni per produrre energia elettrica in corrente alternata. Questo tipo di macchina nasce come motore elettrico e solo successivamente si intuisce il suo potenziale come generatore.

A differenza del generatore sincrono il generatore asincrono non necessita di lavorare alla frequenza di rete, quindi in modo sincrono con essa.

Anche in questo tipo di generatore c'è la presenza di un rotore, collegato all'albero di rotazione, e di uno statore. Sono anch'essi generatori trifase. Lo statore contiene due avvolgimenti per fase, quindi sei in totale, collegati in serie e disposti frontalmente, le coppie polari.



70. Generatore/motore asincrono.

Il rotore è dotato di un ugual numero di fasi poste in cortocircuito.

Quando il rotore gira per effetto della rotazione delle pale, abbiamo un campo magnetico che si muove relativo al rotore. Questo induce una corrente molto forte.

Il rotore stimola così i poli magnetici che sono coinvolti nella rotazione generando, in azione col campo magnetico presente nello statore, una forza elettromotrice.

10.4 Navicella.

La navicella racchiude in se moltiplicatore di giri, generatore elettrico e tutta la componentistica elettronica e di controllo di una turbina eolica. Essa, con la sua struttura, permette il collegamento tra il rotore e la torre.

Nel caso di turbine ad asse orizzontale la navicella è posta in cima alla torre, mentre nel caso di turbine ad asse verticale è posta a livello del suolo.

Nelle HAWT di grande taglia e di ultima generazione la navicella può ruotare intorno all'asse di imbardata (l'asse Y) per seguire meglio il vento, permettendo così al rotore di intercettare sempre la corrente ventosa avente potenza massima.

È composta da una struttura portante generalmente in barre d'acciaio saldate o imbullonate, rivestita da vetroresina o alluminio con apposite aperture per consentire i normali interventi di manutenzione e riparazione all'interno agli organi meccanici ed elettronici.

Essa viene dipinta degli stessi colori del rotore e della torre.



71. Navicella.

10.5 Torre e fondazioni.

Negli impianti eolici la torre gioca un ruolo fondamentale, perché dalla sua altezza e dal suo

posizionamento dipenderà la produzione energetica dell'aerogeneratore nel caso di HAWT.

Nel caso delle VAWT spesso la torre coincide con l'albero di rotazione, di conseguenza sono cilindriche e servono anche come sostegno del rotore.

Ovviamente la torre di qualsiasi tipologia di aerogeneratore deve essere in grado di superare gli sforzi prodotti da qualsiasi tipo di vento.

Le torri per turbine ad asse orizzontale sono:

- a tralicci;
- tubolari.

10.5.1 *Torri a tralicci.*

Le torri a tralicci sono usate per impianti piccoli, mentre non sono utilizzate per le grandi turbine per via del loro impatto visivo importante.

Le torri a traliccio possono essere a loro volta:

- con tiranti;
- autoportanti.

Le prime sono economiche e facili da installare, molto adatte per un aerogeneratore auto-costruito, mentre le seconde sono più costose e si usano quando non si possono applicare i tiranti o quando si ha bisogno di una torre particolarmente solida.



72. Rotori eolici con torre in traliccio.

I vantaggi di queste pale sono legati al costo ed alla facilità di trasporto e di controllo, oltre all'impatto visivo a distanze considerevoli, hanno gli alti costi di manutenzione.

10.5.2 *Torri tubolari.*

Sono sicuramente le torri maggiormente diffuse per applicazioni che vanno dal micro-eolico al multimegawatt. Sono costituite da un cilindro cavo sul quale è alloggiata la turbina.

Il diametro della torre si restringe man mano che l'altezza da terra aumenta. Sono costruite mediante l'assemblaggio di cilindri più piccoli realizzati per calandratura a partire da lamine di acciaio.

Le grandi torri eoliche sono cave al loro interno con una scala di manutenzione che permette all'operatore di intervenire in caso di manutenzione alla navicella posta in cima alla torre.

Particolare attenzione va posta alla risonanza della torre, che non deve assolutamente coincidere con la frequenza di passaggio della pala poiché collasserebbe.

Questo genere di torre non presenta i problemi di impatto visivo delle torri in traliccio essendo più compatto. Presentano però problemi in fase di trasporto ed assemblaggio viste le notevoli dimensioni.

Le torri, sia quelle a traliccio che quelle tubolari, necessitano di *fondazioni*.

Le fondazioni hanno il compito di sostenere la struttura e scaricare al suolo le vibrazioni e le sollecitazioni trasmesse dalla torre. Sono realizzate in cemento armato.

Naturalmente il tipo di materiali utilizzato (calcestruzzo e ferro) deve essere correttamente dimensionato in funzione della tipologia di aerogeneratore che si prevede di installare, oltre a tenere in considerazione il tipo di terreno sul quale si appoggia la torre.



73. *Torre eolica tubolare.*

Nel caso il terreno sia cedevole si ricorre all'utilizzo di pali opportunamente piantati nel terreno. Ovviamente la messa in piano del terreno su cui viene costruita la torre è d'obbligo. Il parametro principale nella verifica della struttura è la resistenza alla massima spinta orizzontale, che in genere si verifica alla velocità nominale.



74. *Vista interna di una torre tubolare.*

11 AUTO-COSTRUZIONE DI UNA TURBINA EOLICA: IL VENTOLONE.

11.1 L'idea.

L'idea e il progetto nascono nell'estate 2006 a Makambako presso la missione locale, tramite la collaborazione dell'Ing. Mario Milanesio e Padre Remo Villa, con lo scopo di sfruttare la risorsa eolica presente sul territorio in maniera costante. Un po' per scherzo e un po' sul serio viene realizzato in loco il primo pre-prototipo ricalcando i generatori ad asse verticale Ropatec.



75. Primitivo prototipo del VentolOne.

Lo scopo del progetto VentolOne è il seguente:

“Ci si propone la realizzazione di una cooperativa di produzione di micro-generatori eolici in Paesi in Via di Sviluppo, da vendersi a un prezzo accessibile alla popolazione locale. Il generatore sarà coperto da brevetto aperto, in modo che sia facilmente replicabile e diffondibile.”

Altri progetti si sono articolati come il progetto VentolOne, in particolare è stato preso in considerazione l'Aeromotore 3.4.5. ad asse orizzontale progettato dal Cast (Centro per un Appropriato Sviluppo Tecnologico) di Laveno (Va).

I punti in comune tra i due progetti sono i seguenti:

- Studiare soluzioni tecnicamente semplici che garantiscano buoni rendimenti;
- limitare al minimo indispensabile i componenti non riproducibili a livello industriale;

- semplificare al massimo la concezione delle parti costruibili sul posto;
- impiegare materiali adeguati;
- elaborare un semplice manuale per la costruzione dell'aerogeneratore.

Altro esempio è il generatore di William Kamkwamba, un ragazzo del Malawi che con pochi pezzi provenienti dalla sua bicicletta ha costruito un generatore eolico rudimentale, attraverso il quale genera la corrente elettrica necessaria all'illuminazione notturna della sua abitazione. La notizia si è diffusa rapidamente tanto da finire sul Wall Street Journal.

La notorietà ha consentito al giovane di essere invitato alla conferenza del TED (Technology Entertainment Design) conseguendo una borsa di studio per frequentare la scuola.

Questo esempio dimostra come l'interesse per il micro-eolico sia ben presente anche nelle popolazioni locali dei PVS che presentino adeguate ventosità, sia come la richiesta di un bagaglio di conoscenze tecniche risulti pressante per uscire da una arretratezza endemica. É possibile osservare l'esperienza di William Kamkwamba attraverso il sito: <http://williamkamkwamba.typepad.com/>



76. Il generatore eolico di William Kamkwamba.

Perché un impianto micro-eolico?

Prima di tutto si è valutato il contesto sociale nel quale un'innovazione di questo tipo si sarebbe inserita e le necessità della popolazione locale. Nei Paesi in Via di Sviluppo ad oggi la popolazione usufruisce dell'energia elettrica per lo più per piccoli usi domestici

(illuminazione, televisione, radio) e quindi si limita a poche centinaia di Watt per abitazione e per poche ore al giorno.

La taglia dell'impianto di generazione dovrà quindi essere in grado di coprire il fabbisogno di alcune abitazioni e non potrà superare le poche centinaia di Watt. Si esclude quindi la tipologia del grande eolico.

Nei PVS una disponibilità di energia così grande, nonostante possa soddisfare un numero elevatissimo di famiglie, non produrrebbe alcun vantaggio in quanto la popolazione non ha bisogno di tutta l'energia di cui ha bisogno un Paese sviluppato.

Inoltre un impianto di dimensioni notevoli avrebbe richiesto uno studio preliminare lungo e costoso, ed altrettanto costoso sarebbe stata l'installazione di una turbina di grandi dimensioni. Il trasporto ed i costi di manutenzione sarebbero stati elevatissimi in quanto in molti PVS non esistono vie di comunicazione idonee al passaggio di grandi mezzi, se si escludono le principali vie di comunicazione nazionali.

Gli obiettivi che il progetto VentolOne si pone, oltre a quelli già elencati in precedenza, sono i seguenti:

- sfruttare la risorsa eolica presente sul territorio per produrre energia elettrica o energia meccanica;
- condividere gratuitamente l'esperienza acquisita;
- creare una turbina di facile costruzione;
- rendere il trasporto della turbina facile.

Un ulteriore problema che caratterizza la risorsa eolica è la sua variabilità sia stagionale che giornaliera; ciò influenza la produzione di energia elettrica che per forza di cose non sarà costante durante l'arco dell'anno e durante la giornata.

Il modo più semplice di risolvere questo problema è collegare l'abitazione o la struttura richiedente energia elettrica alla rete nazionale che è in grado di sopperire all'andamento altalenante della risorsa eolica.

Il VentolOne però si propone in un contesto dove non è possibile collegarsi con la rete elettrica nazionale e questo implica affrontare il problema della variabilità in maniera diversa. Esistono due soluzioni per sopperire alla variabilità del vento a seconda degli utilizzatori finali dell'energia estratta dal vento e dei bisogni della comunità nella quale viene installata una turbina micro-eolica.

Il primo sistema riguarda l'integrazione della turbina micro-eolica con dei pannelli fotovoltaici opportunamente dimensionati; in questo modo si avrebbe sempre un minimo di

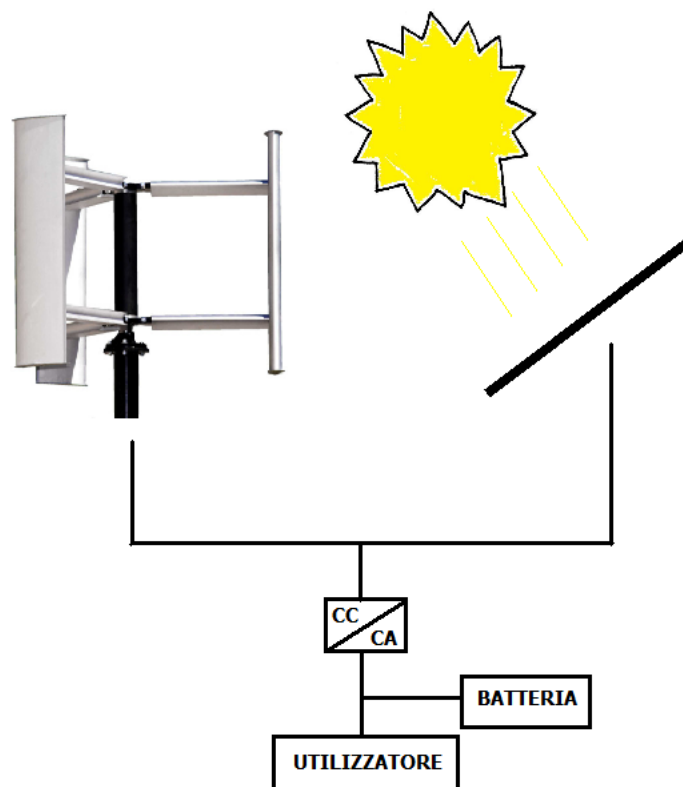
energia elettrica prodotta che garantisce il funzionamento degli apparecchi utilizzatori come pompe, frigoriferi, radio.

Anche l'energia solare ha una sua variabilità giornaliera dovuta all'alternanza del di e della notte. Se l'utilizzatore finale necessita di energia solo nella fascia diurna del giorno è sufficiente l'accoppiamento di turbina eolica e pannelli fotovoltaici, altrimenti si deve prevedere un sistema di accumulo con batterie.

Non bisogna sottovalutare la tipologia di corrente richiesta dall'utilizzatore:

i pannelli fotovoltaici producono energia elettrica in corrente continua, mentre la produzione di energia della turbina eolica dipende dal generatore utilizzato.

Qualora l'utenza sia in corrente alternata si deve predisporre l'installazione di un inverter a monte degli utilizzatori. L'inverter rappresenta un costo notevole in un impianto elettrico di piccole dimensioni e difficilmente può essere costruito in loco dalla popolazione locale. Esso va quindi opportunamente dimensionato per evitare inconvenienti causati da sovratensioni.



77. Accoppiamento eolico-fotovoltaico.

È possibile inoltre l'accoppiamento con generatori a motore alimentati ad olio vegetale. In questo modo l'alternanza di energia elettrica verrebbe completamente azzerata poiché il generatore può essere azionato in qualsiasi momento ed è in grado di fornire l'energia richiesta essendo anche regolabile.

Il secondo modo di sfruttare la risorsa eolica sopperendo alla sua variabilità è quello di sfruttare l'energia del vento convertendola in energia meccanica che permetta il funzionamento di macchinari.

Solitamente il vento è presente durante il giorno, quindi quando le attività umane sono nel pieno del loro svolgimento; l'azionamento di macine o presse è quindi possibile senza dover ricorrere all'ausilio di motori elettrici.

La turbina eolica può anche azionare direttamente una pompa per il sollevamento di acqua da accumulare in un serbatoio opportunamente dimensionato in modo che possa sopperire ad eventuali periodi di mancanza di vento. Un uso ancora migliore è l'irrigazione di campi coltivati in quanto le colture non risentono eccessivamente di brevi periodi, anche di qualche giorno, in cui manca l'acqua. Quest'ultimo passaggio non è di facile comprensione a tutte le popolazioni ed occorre quindi una formazione riguardo le buone pratiche agricole a monte dell'installazione di un'aeropompa.

È inoltre possibile prevedere l'accoppiamento di una turbina eolica con la trazione animale, a patto che il costo di acquisto e di sostentamento dell'animale non sia antieconomico per la comunità o la famiglia in cui lavora.

In generale, una volta effettuata l'analisi anemometrica del sito e capito le fasce temporali in cui la risorsa vento è presente, si deve cercare di far coincidere quanto più possibile i consumi di energia, elettrica o meccanica, con la produzione della turbina eolica e prevedere sistemi di accumulo qualora l'energia prodotta presenti un surplus in fasce orarie dove non è richiesta.

È anche buona pratica accoppiare a turbine micro-eoliche altri sistemi di produzione di energia, come fotovoltaico, forza animale o generatori elettrici.

11.1.1 Il blog.

Parallelamente all'esperienza di costruzione del VentolOne, ed ai fini della condivisione gratuita delle informazioni, è stato creato un blog dove vengono documentati tutti i progressi riguardanti il progetto.

Grazie a questo sistema di condivisione è stato possibile avviare una serie di contatti con utenti della rete da tutte le parti del mondo.

In genere i visitatori del blog chiedono informazioni riguardanti lo sviluppo del VentolOne, ma taluni si mostrano disponibili a condividere la loro esperienza a seconda delle tematiche trattate, offrendo il loro supporto tecnico nonché il loro bagaglio culturale.

Naturalmente anche la tecnologia usata per diffondere il VentolOne deve essere open-source.

Per questo motivo la piattaforma scelta per la diffusione del blog è wordpress.com.

“WordPress è una piattaforma di "personal publishing", strutturata in PHP e che usa come database MySQL, che consente la creazione di un blog personale, pubblico o privato. Creata da Matt Mullengweg, attualmente è distribuita con la licenza GNU General Public Licence e si può scaricare liberamente.” (fonte Wikipedia).

Il blog si trova all'indirizzo:

www.inventiamociilsviluppo.wordpress.com

Il blog è diviso in sei aree tematiche che offrono informazioni riguardanti il progetto ed il suo sviluppo.

Le aree tematiche presenti sono:

- blog;
- documenti e materiale;
- english (attualmente in fase di sviluppo);
- cos'è il VentolOne;
- energia;
- chi siamo.

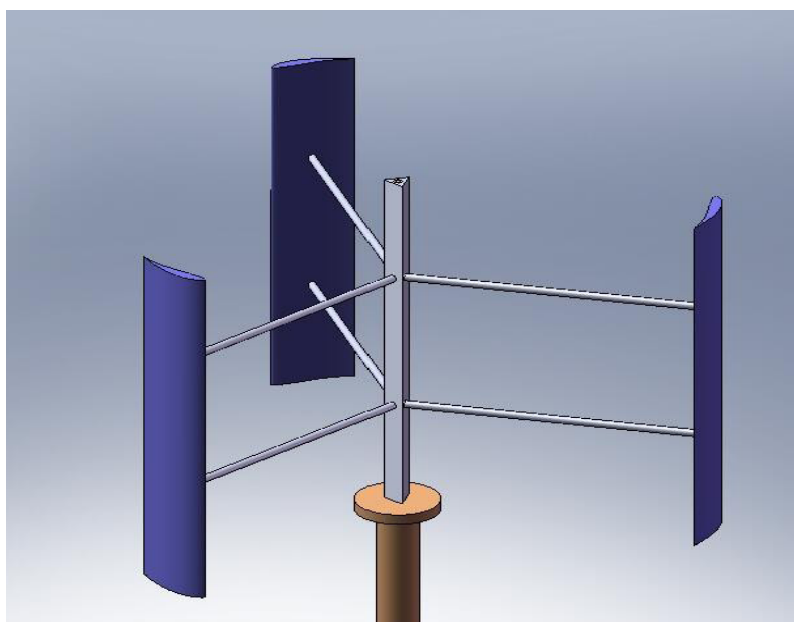
Il blog è visitato quotidianamente da circa 16 persone. I contatti provengono principalmente dall'Italia con più di 2200 visite, seguiti da Statunitensi, Svizzeri e Tedeschi. Si registrano contatti anche dal Messico e dalla Thailandia.

Come ulteriore mezzo di diffusione è stato scelto www.youtube.com dove sono presenti i filmati delle prove del VentolOne. La parola chiave per trovarli è *ventolone*.

11.2 Il VentolOne.

Per VentolOne si intende una turbina eolica Darrieus ad asse verticale dotata di un numero minimo di tre profili alari, che trae spunto dall'analoga turbina commerciale della Ropatec.

Il progetto mira a una ingegnerizzazione dello studio affinché esso sia poi riproducibile in una realtà tecnologicamente arretrata e quindi diventi fonte di reddito, di sviluppo e progresso tecnologico.



78. Simulazione grafica VentolOne.

Il VentolOne può essere utilizzato per la produzione di corrente elettrica, attraverso il collegamento con un generatore elettrico di taglia adeguata, sia in eventuale abbinamento con pannelli solari per sistemi off-grid che prevedano un sistema di accumulo della corrente elettrica prodotta.

Diversamente l'energia ricavata dal vento può essere convenientemente utilizzata per il sollevamento di acqua dal sottosuolo, eventualmente immagazzinabile in appositi serbatoi che possano sopperire a una certa variabilità del vento, oppure essere convertita in energia meccanica da utilizzare per l'azionamento di macchinari.

11.2.1 Fasi dello sviluppo.

Citando direttamente dal testo del progetto, il VentolOne si sta sviluppando secondo le seguenti fasi:

Fase preliminare:

1. acquisto di anemometro per rilievo dei dati di vento su un periodo prolungato

(6 mesi – 1 anno);

2. individuazione di una struttura – associazione che si dica disponibile ad accogliere su un terreno adatto l'installazione dell'anemometro;
3. individuazione di personale locale / in loco che possa eseguire il rilievo dei dati, con una periodicità il più possibile diluita nel tempo, nonché alla trasmissione in Italia;
4. individuazione dei mezzi di spedizione più opportuni;
5. studio della cultura locale, delle usanze e delle tradizioni e dell'impatto sociale che il VentolOne potrebbe avere.

Fase di studio:

1. studio della fluidodinamica del VentolOne e ottimizzazione dei profili alari;
2. studio della ventosità del sito candidato all'installazione del prototipo, attraverso rilievo in loco di dati di vento e/o attraverso il Web (vedasi: www.tutitempo.net/en);
3. studio del Ventolone e delle funzionalità in termini di accoppiamento a una rete elettrica AC oppure DC, oppure a una pompa per sollevamento dell'acqua;
4. realizzazione di un prototipo in Italia per l'ottimizzazione del generatore;
5. definizione dei contatti in loco (missionari, diocesi, ong);
6. sopralluogo nel sito candidato all'installazione e contatto con potenziali fornitori;
7. costruzione di un prototipo in loco.

Studio della cooperativa:

1. determinazione della produttività presumibile, noto il vento medio e la distribuzione di ventosità;
2. definire i criteri minimi per la realizzabilità e la realizzazione in loco;
3. definizione della struttura della cooperativa in termini di:
 - edilizia;
 - risorse umane (struttura dirigenziale, manodopera);
4. individuazione di potenziali fornitori;
5. calcolo della presumibile produttività annua della cooperativa;
6. analisi della autosufficienza della cooperativa.

L'obiettivo del presente lavoro è quello di sviluppare un prototipo in Italia e di valutarne le prestazioni.

Gli altri punti verranno conclusi in seguito e pubblicati su:

<http://inventiamoci1sviluppo.wordpress.com/>.

11.2.2 Prototipo.

Il primo prototipo del VentolOne è stato realizzato a Makambako nel 2006 (vedi figura 76.) e ha visto l'utilizzo di materiali facilmente reperibili in loco (Makambako è una città di 80.000 abitanti nell'entroterra tanzaniano) quali legno, lamiera, viti e cuscinetti a sfera di recupero.

È stato installato in via provvisoria all'interno del cortile della parrocchia ha dimostrato subito la sua potenzialità in termini di auto-avviamento anche in presenza di poco vento.

Le dimensioni del prototipo:

diametro	1,2 m;
altezza	0,8 m;
Velocità angolare massima rilevata	60 giro/min;
potenzialmente pari a circa	100 Watt.

Questo primo prototipo è servito a dimostrare che si può realizzare una turbina eolica funzionante con pochi materiali a disposizione ed in un tempo decisamente ristretto.

Si è deciso di costruire anche un prototipo in Italia, in modo da poter effettuare le corrette prove per consegnare un brevetto open-source ai PVS.

11.3 VentolOne 1.1.

In Italia è stato sviluppato tra il mese di novembre 2008 ed il mese di maggio 2009 il primo prototipo di turbina.

Il VentolOne 1.1 presenta una serie di problemi che andremo a trattare in seguito, dovuti alla scarsa esperienza nel settore del team che l'ha costruito, all'interpretazione sbagliata di alcuni testi nonché dalla mancanza di materiale in rete ed in biblioteche col quale confrontarsi e trarre spunto.

Uno degli obiettivi della realizzazione del VentolOne 1.1 è mettere a disposizione del pubblico l'esperienza acquisita corredata da errori e successi, il tutto per rendere agevole la costruzione di un H-Darrieus evitando di incappare in problemi già affrontati e risolti da altri.

È stata definita la geometria dell'aerogeneratore optando per un H-Darrieus a tre pale.

I motivi che hanno portato alla scelta di questo tipo di tecnologia sono:

- basso livello tecnologico richiesto per la realizzazione;
- basso know-how tecnico;
- auto-costruzione molto facile;
- realizzazione con materiali di recupero e con attrezzature non industriali;

- indipendenza dalla direzione del vento;
- capacità di lavorare con venti mediamente turbolenti e di bassa intensità.

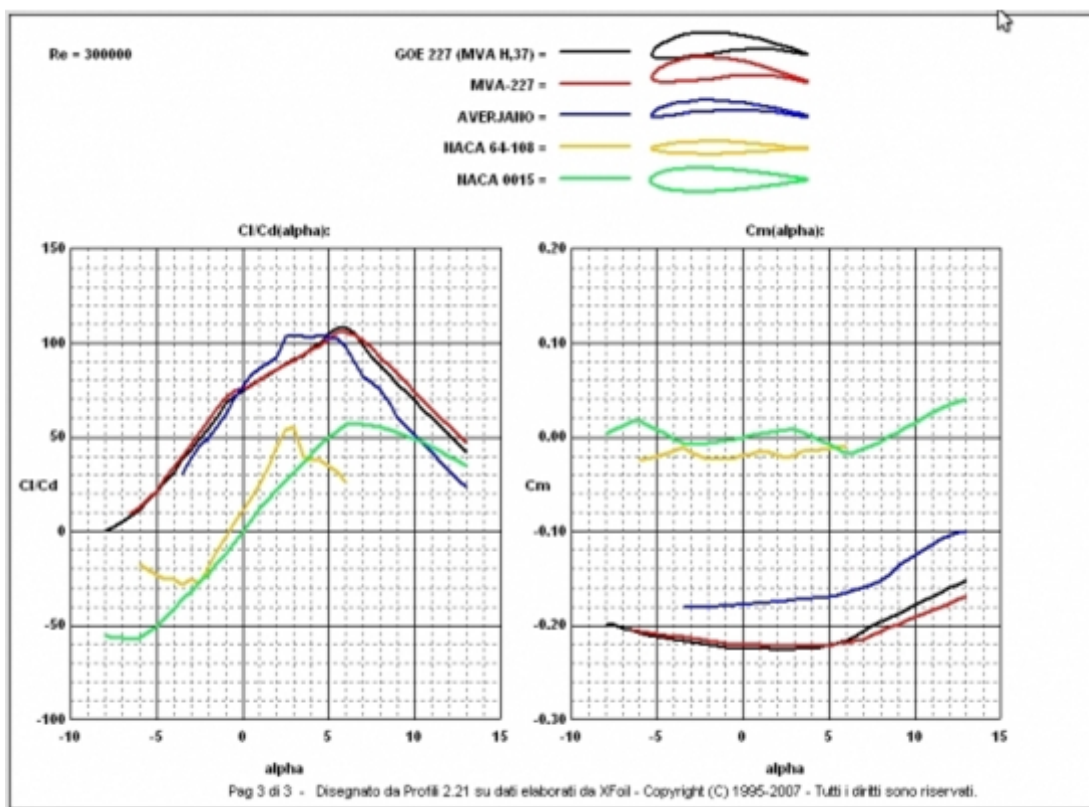
Altro obiettivo è semplificare il montaggio della turbina eolica in modo che essa sia facilmente trasportabile a seconda delle esigenze.

Il prototipo VentolOne 1.1 ha seguito le seguenti fasi di realizzazione:

- scelta del profilo;
- costruzione;
- prove;
- commenti e modifiche.

11.3.1 Scelta del profilo.

Nella definizione del profilo alare che si adatti meglio alla geometria di una H-Darrieus, e cercando anche una possibile stima delle caratteristiche di $P_f(v)$ e $Q_f(v)$, dove Q è la coppia, ci si è imbattuti in problema legato alla *tip speed ratio*.



79. Confronto polari di vari profili.

Dalla bibliografia e dalla consultazione di molti siti web si è ricavato un valore massimo ottenibile di λ pari a 4-5 per turbine Darrieus e H-Darrieus, mentre altre fonti danno per le

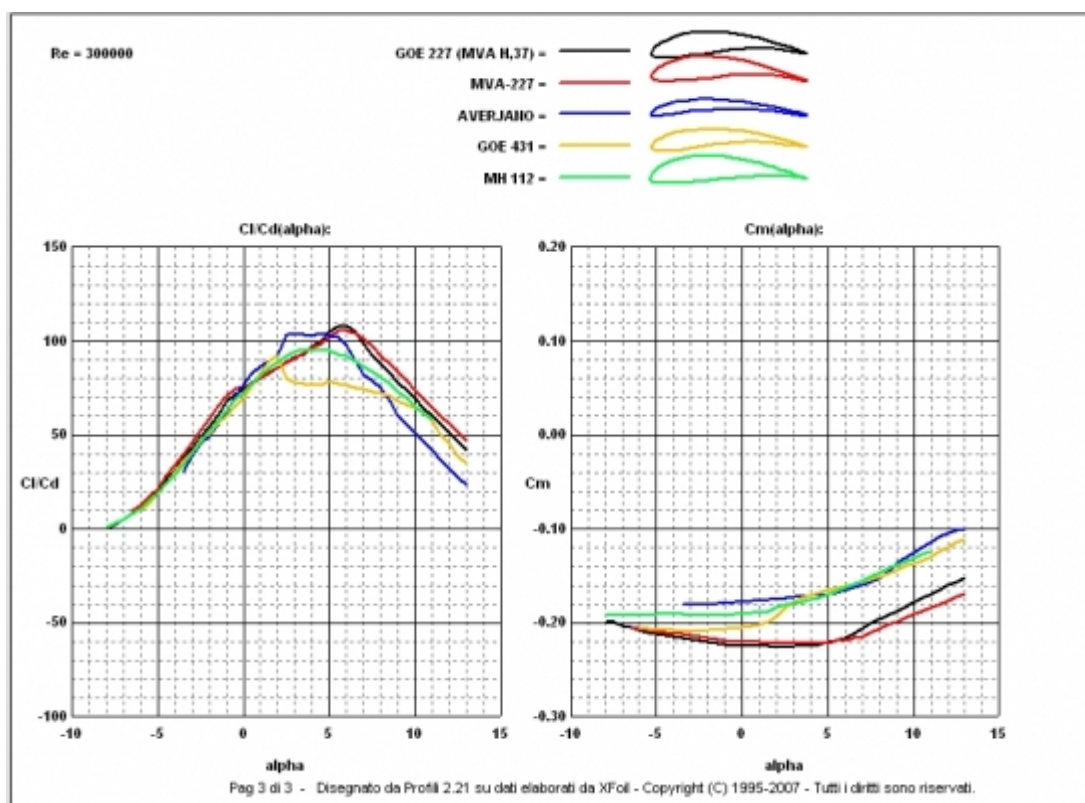
turbine H-Darrieus valori di λ pari a 1. Questo parametro sarà oggetto di discussione e correzione nel paragrafo *Commenti e prove*.

La scelta del profilo si è subito orientata su un profilo asimmetrico, in quanto i profili simmetrici non forniscono una portanza sufficiente e sono usati solo dove occorre una scarsa resistenza all'avanzamento ad esempio nei piani di coda degli aeromobili.

Usando il programma Profili 2.19 (facilmente reperibile su www.profilo2.com) è stata fatta una scelta tra 2203 tipi di profili differenti.

Il grafico precedente è servito per orientare la scelta su un profilo concavo-convesso scartando i profili simmetrici sia tozzi che sottili, in questo caso NACA 0015 e NACA 64 108.

Per un grossolano errore non è stato tenuto conto del reale valore di Re al quale lavorerà il profilo. Da successive analisi è emersa, comunque, la necessità di usare un profilo asimmetrico scartando i profili simmetrici.



80. Confronto polari profili asimmetrici.

Una volta scelta la tipologia del profilo, quindi un profilo asimmetrico concavo-convesso, ci si è soffermati su cinque profili (vedi figura 80.):

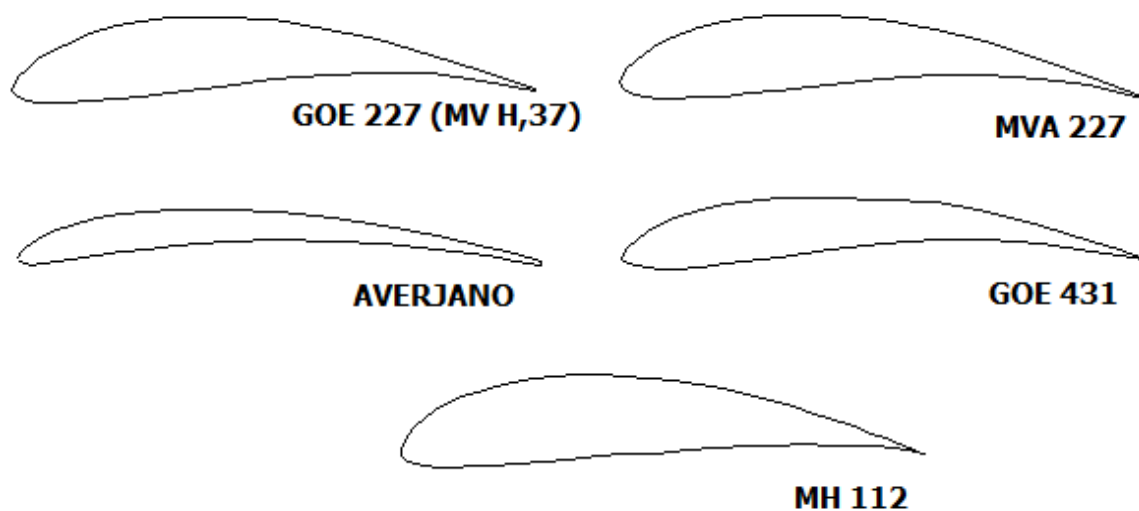
- GOE 227 (MVA H,37);
- MVA 227;

- AVERJANO;
- GOE 431;
- MH 112.

La scelta è ricaduta sul MVA 227 poiché ha il migliore rapporto C_L/C_D per angoli di attacco compresi tra 0° e 10° , il range al quale si vuol far lavorare in VentolOne.

La scelta non ha tenuto conto del C_m (coefficiente di momento).

Per quanto riguarda la geometria del profilo è stato deciso di utilizzare una pala con corda lunga perché secondo la letteratura questa soluzione genera più portanza alle basse velocità. Tuttavia questa soluzione incide sull'allungamento alare λ_a in senso negativo, aumentando la resistenza indotta del profilo, quindi occorre avere un'ala sufficientemente lunga.



81. Prima scelta tra profili alari.

Riguardo l'ala è stato deciso di contenerne le dimensioni entro un certo limite preferendo allargare il diametro del VentolOne.

Il numero di pale per il primo prototipo è stato deciso in tre unità, per ovviare a problemi costruttivi ed evitare turbolenze.

Riassumendo, la geometria del profilo e delle pale è la seguente:

profilo	MVA-227
corda c	0,3 m
$\lambda_{progetto}$	$1 \div 2$
numero di pale	3
diametro rotore	$1 \div 1,5$ m

lunghezza della pala	1 m
λ_a	$2 \div 2,5$
solidità	0,9

Individuato il profilo e la sua geometria si è appurato che per l'estrazione di energia dal vento si possono utilizzare i profili alari tanto con concavità verso l'interno (soluzione comunemente adottata) quanto concavità verso l'esterno. Si è optato per la soluzione con concavità rivolta verso l'interno per paura di eccessive turbolenze durante il moto circolare del rotore.

11.3.2 Realizzazione.

Uno degli obiettivi principali del progetto è semplificare la costruzione ed il montaggio della macchina eolica. Dopo un'attenta analisi si è deciso di dividere il VentolOne in cinque macro-elementi:

- tre (3) pale;
- un (1) corpo centrale;
- uno (1) statore.

Questa semplificazione ha lo scopo di agevolare il montaggio e lo smontaggio della turbina eolica, che può essere quindi spostata da un sito all'altro in poco tempo senza dover ricorrere a strumenti particolari. Inoltre il peso relativamente basso (stimato in 50 kg) ne consente un trasporto agevole. Ogni macro-elemento non viene a pesare più di 12,5 kg.

Come precedentemente asserito il VentolOne è stato realizzato per la quasi totalità con materiali di recupero provenienti da centri di raccolta oppure direttamente da aziende sotto forma di scarti di lavorazione.

Le uniche componenti nuove sono i cuscinetti dello statore e le centine del profilo alare, realizzate in legno da un falegname di Cuneo.

Le attrezzature presenti nell'officina sono:

- chiavi inglesi metriche;
- cacciaviti;
- seghetti a mano per metallo e legno;
- martelli;
- pinze e tenaglie;

- cesoie per alluminio;
- trapano a colonna e trapano portatile;
- flessibile;
- saldatrice;
- rivettatrice
- rivetti;
- viti e bulloni assortiti.

Le attrezzature utilizzate sono quindi facilmente reperibili anche in un'officina africana.

I materiali usati sono:

- lamiera di alluminio; scarto di tipografia;
- tubo dell'acqua; scarto di una ristrutturazione;
- barre a L in acciaio; scarto di ristrutturazione;
- placchette in acciaio; scarto di lavorazione meccanica;
- tubi vari; scarto di lavorazione meccanica;
- bulloni e viti; già presenti in officina;
- cuscinetti a sfera conici; nuovi regalati da un'azienda meccanica;
- tubo di sostegno per lo statore; scarto di lavorazione meccanica;
- 6 centine in legno; nuove costo 60 euro.

I materiali utilizzati invece difficilmente potranno essere disponibili in un paese africano, si tratta in questo caso di far tesoro delle disponibilità presenti.



82. Officina dove è stato realizzato il VentolOne.

Nella costruzione si è proceduto nel seguente modo:

Le **pale** sono realizzate con due centine di sagoma opportuna (MV-227) collegate da un longherone.

Il longherone a sua volta è formato da due tronchi di barre a L saldati.

Infine la pala è creata “avvolgendo” le centine con della lamiera di alluminio da tipografia facilmente modellabile.

La lamiera viene fissata alla centina semplicemente con dei rivetti o delle viti Parker.

Il **corpo centrale** è un semplice tubo per impianti idraulici a cui collegare per saldatura i bracci che vanno alle pale.

Lo **statore** è anch'esso un tubo alle cui estremità sono inseriti due cuscinetti conici a rulli.

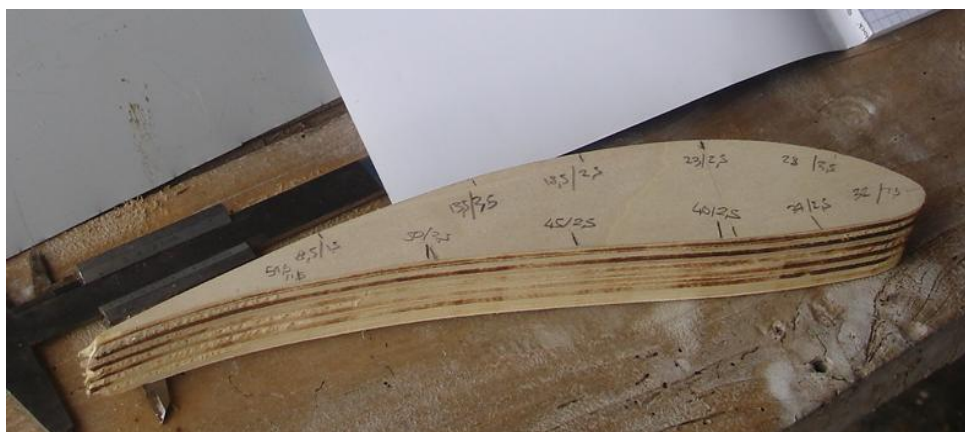
11.3.2.1 **Pale.**

Una volta determinato il profilo alare, la geometria ed i materiali con i quali si vuole realizzare l'ala si è proceduto alla costruzione vera e propria.

Le centine sono in legno compensato di 11 strati dello spessore totale di 30 mm.

La scelta è ricaduta su questo tipo di materiale per via della facilità di lavorazione del legno e della sua facile reperibilità nei PVS, oltre al suo basso costo. In Italia il costo eccessivo è dovuto all'utilizzo di macchinari specifici per la sagomatura del legno, ma sarebbe stato tranquillamente realizzabile nell'officina a nostra disposizione.

Dalle centine in legno si è ricavata la lunghezza del profilo in modo da poter avere le dimensioni corrette per tagliare la lamiera. Inoltre sono state decise le distanze tra le viti che fissano la lamiera alle centine, facendo attenzione che le viti stesse non vadano a toccarsi una volta entrate nelle centine.



83. Centina utilizzata per la costruzione delle ali.

Una volta rilevate le misure del rivestimento si è proceduto a tracciare la lamiera facendo attenzione a mantenere perfettamente ortogonale la tracciatura.

Le dimensioni del rivestimento sono 1000 X 660 mm.

Tracciata la lastra di alluminio si è proceduto al taglio tramite cesoie a mano e alla successiva tracciatura ed esecuzione manuale dei fori con un martello ed un chiodo.



84. Foratura manuale del rivestimento.

Successivamente è stato realizzato il longherone.

Il longherone è formato da due barre di acciaio a L, recuperate da un lavoro di ristrutturazione.

Lo spessore dell'acciaio è 2 mm, la lunghezza della barra è 940 mm ed i due lati sono lunghi 30 mm.

Essendo il materiale scarto di lavorazione non si è potuto risalire al grafico della prova di trazione, ricavandone i valori di resistenza a taglio e a trazione. Di conseguenza non sono stati eseguiti calcoli durante la progettazione del longherone.

L'assenza di calcoli è voluta, non è una gravissima mancanza progettuale. Si ricorda che lo scopo di questo primo prototipo di VentolOne è capire la sua reale fattibilità, mentre le prestazioni saranno valutate solo in seguito una volta appurato il funzionamento della macchina eolica.

I due tronchi di barre sono stati saldati uno di “schiena” all'altro a distanza di 80 mm per un totale di dodici punti di saldatura.

La saldatura non è indispensabile, difatti la si può sostituire con un'imbullonatura alla

medesima distanza della saldatura. Ovviamente i bulloni dovranno di essere di dimensioni adatte.

Gli estremi delle barre sono stati piegati, creando una linguetta che in seguito è stata forata in modo tale da poter permettere al longherone di essere imbullonato alle centine.

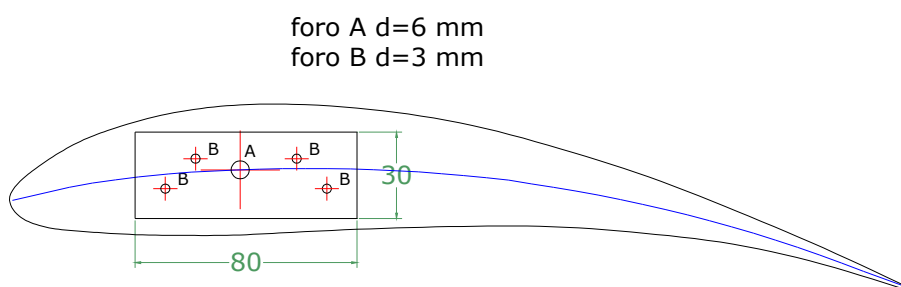


85. Longherone.

Sulle centine sono stati eseguiti dei fori con l'ausilio del trapano a colonna in corrispondenza dei fori presenti sulle linguette dei longheroni.

Nel foro contrassegnato con la lettera **A** è stato pensato e realizzato per consentire l'inserimento di una vite passante da usare per la regolazione dell'angolo di attacco.

Gli altri fori permettono il passaggio di viti autofilettanti consentendo il corretto fissaggio del longherone alla centina.



86. Ancoraggio del longherone alla centina.

Una placchetta di acciaio dello spessore di 2 mm è stata posizionata e fissata sulla parte esterna delle centine. Questa placchetta ha la funzione di impedire ai bracci del VentolOne di toccare direttamente l'ala.

Il foro **A** permette il passaggio della vite utilizzata per regolare l'angolo di attacco del profilo, mentre i fori **B** consentono il fissaggio della placchetta alla centina.

Le misure sono riportate in millimetri.

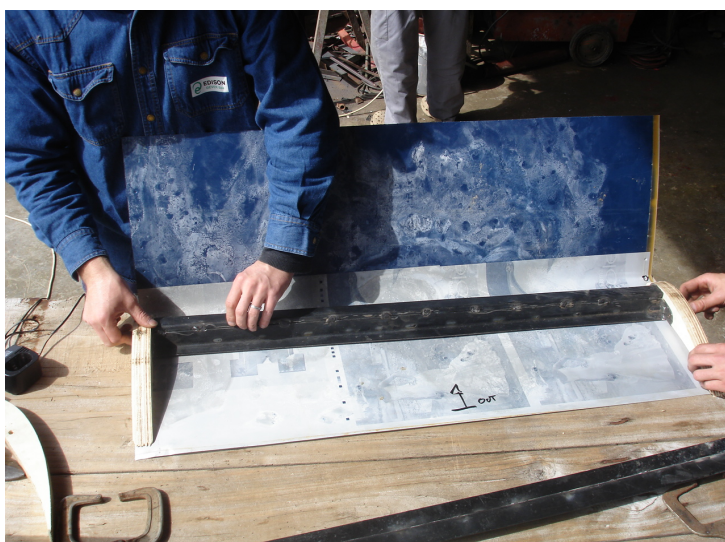


87. Vite di regolazione angolo di attacco.

Completate queste lavorazioni si è proceduto al montaggio del rivestimento sui tre scheletri costruiti.

La difficoltà incontrata in questa fase è stata riuscire a far combaciare il rivestimento con il profilo. Al rivestimento è stato fatto un invito per la piegatura in corrispondenza del bordo di attacco del profilo. L'invito è stato eseguito piegando in rivestimento su di un tubo di opportuno diametro simile al bordo di attacco del profilo.

In seguito longherone e centine precedentemente fissati sono stati posizionati sul rivestimento.



88. Fase di montaggio dell'ala.

Dalla figura è possibile notare i punti di saldatura a distanza regolare di 80 mm.

Il fissaggio è cominciato dal bordo di attacco tramite viti autofilettanti della lunghezza di 25 mm, per poi arrivare al bordo di uscita riducendo la lunghezza delle viti fino a 10 mm.

Le viti usate hanno la testa piano-svasata.



89. *Pale completate.*

Per facilitare l'aderenza del rivestimento alla sagoma del profilo è stato appositamente creato un corrente a C, sul quale il rivestimento viene fissato tramite due viti Parker.

Il corrente a C non ha funzioni strutturali ma solo aerodinamiche.

La lamiera viene fissata sul ventre del profilo al longherone per mezzo di viti Parker. In questo caso si è dimostrato sufficiente l'utilizzo di una sola vite al centro del longherone.

11.3.2.2 *Corpo centrale e statore.*

Il corpo centrale è costituito da uno statore nel quale sono alloggiati i cuscinetti ed un rotore che tramite bracci collega le pale al tubo centrale.

Lo **statore** è costituito da un tubo proveniente da uno scarto di lavorazione meccanica delle dimensioni di: diametro esterno 60 mm, diametro interno 54 mm, altezza 350 mm. Agli estremi sono stati ricavati per tornitura due alloggi per i cuscinetti a sfera conici delle dimensioni di: diametro esterno 56 mm, diametro interno 28 mm, altezza 15 mm. I cuscinetti conici si sono resi necessari in quanto i carichi radiali sono sostenuti, oltre a quelli assiali.

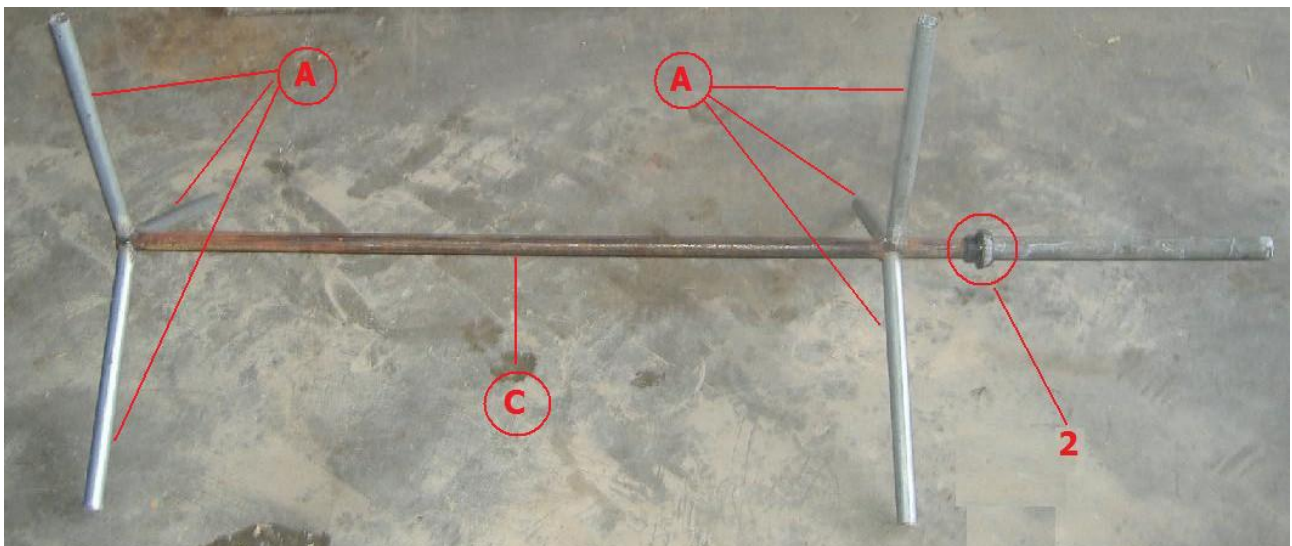
È fissato all'incastellatura tramite bracci. Attualmente il fissaggio viene realizzato per saldatura ma ovviamente è possibile procedere alla giunzione tramite imbullonatura.

È stato scelto il tubo più robusto a disposizione per via dei notevoli carichi e delle vibrazioni trasmesse dal rotore.



90. Statore ed ancoraggio all'incastellatura.

Il **rotore** è costituito da un vecchio tubo dell'acqua in acciaio di diametro di 26,6 mm sul quale sono stati saldati i tronchi dei bracci.



91. Corpo centrale del VentolOne.

Il corpo centrale, indicato con la lettera **C**, è stato realizzato per taglio tramite seghetto a mano partendo da uno scarto di ristrutturazione edilizia.

Sulla parte più bassa è stato praticato un foro passante che consente il fissaggio della puleggia.

La parte finale del corpo centrale una volta montata nello statore fuoriesce da esso di 100 mm per permettere appunto l'accoppiamento con la puleggia.

Con la lettera **A** sono indicati i tronchi di bracci A, che consentono lo scorrimento al loro interno di altri tubi più piccoli, i tronchi di bracci B. Lo scorrimento permette l'aumento o la diminuzione del diametro del VentolOne, da un minimo di 800 mm ad un massimo di 2000 mm.

I bracci A hanno le seguenti dimensioni:

di diametro	25 mm;
lunghezza	500 mm.

All'estremità dei bracci A sono presenti dei fori passanti di diametro 3 mm che permettono il serraggio con i bracci B tramite una vite di opportuna lunghezza, fissando il diametro del rotore.

I bracci A sono stati fissati al corpo centrale tramite saldatura ad una distanza di 120° l'uno dall'altro.

La distanza dalla due terne di bracci è di 1050 mm.

Durante la lavorazione si è presentato il problema del perfetto parallelismo tra le coppie di bracci che devono bloccare la stessa pala. Si è proceduto quindi all'esecuzione di una coppia per volta partendo dal fissaggio del braccio più alto, in quanto presenta maggiori difficoltà. Successivamente si è passati alla saldatura del suo braccio gemello a distanza di 1050 mm ponendo molta attenzione a mantenere il parallelismo col primo braccio saldato e l'ortogonalità con il corpo centrale.

In seguito si è passati al fissaggio delle altre due coppie di bracci ponendo l'attenzione nel mantenere le distanze tra le coppie di bracci prossime ai 120°.

L'errore stimato è nell'ordine di $1 \div 2^\circ$.

Nel caso trattato in questa tesi di laurea l'errore non va ad inficiare il risultato finale. Difatti si tratta di un prototipo costruito per studiarne la fattibilità con materiale di recupero ed attrezzature poco avanzate. In questa fase non si ricerca quindi la perfezione dimensionale che avrebbe lo stesso manufatto costruito da artigiani esperti o da industrie.

L'errore è quindi tollerabile.

Con il numero **2** in figura 91.) è indicato il cuscinetto a rulli conico reso solidale al corpo centrale tramite saldatura in due punti. L'operazione di saldatura si è resa necessaria per via del gioco presente tra il rotore e l'anello centrale del cuscinetto. La saldatura è stata eseguita con molta cautela ed in soli due punti per prevenire la deformazione del cuscinetto dovuta al calore dell'operazione. Una saldatura male eseguita avrebbe rovinato le caratteristiche

geometriche del cuscinetto rendendolo inutilizzabile.

Il gioco presente tra il rotore ed il cuscinetto conico impediva al cuscinetto stesso di svolgere le funzioni per cui esso era preposto. Difatti è stato osservato che non ruotava ma si limitava a solo a sostenere gli sforzi assiali. Inoltre il cuscinetto a rulli **2** ha lo scopo di sostenere verticalmente il peso del VentolOne, poiché il corpo centrale fuoriesce dal basso dello statore per una lunghezza di 100 mm, permettendo così l'accoppiamento con una puleggia.



92. Cuscinetto conico a rulli solidale al corpo centrale.

Approfondiremo nel seguito il tema dell'accoppiamento con la puleggia.

Come precedentemente asserito è possibile variare il diametro della turbina attraverso dei bracci scorrevoli.

I tronchi di braccio B sono anch'essi realizzati partendo da materiali di recupero. Una volta appurata la tenuta del tubo con una prova di flessione molto rudimentale si è proceduto alla lavorazione.

Le dimensioni dei tronchi B sono:

diametro	21 mm;
lunghezza	400 mm.

A distanza regolare di 100 mm su ogni tronco B è stato creato un foro passante di diametro 3 mm. Il foro permette il serraggio con i bracci A tramite una vite passante di opportuna lunghezza. Si ottiene quindi la possibilità di aumentare o diminuire il diametro del rotore di intervalli regolari di 200 mm.

La lavorazione è stata resa lunga dalla presenza di una patina di ruggine sull'esterno del tubo, che non consentiva il perfetto scorrimento dei tronchi B all'interno dei bracci A solidali al corpo centrale.

L'estremità dei bracci B non coinvolta nello scorrimento è stata schiacciata in morsa per avere

una facilità nel serraggio migliorata.

In questa parte di ogni braccio B è stato praticato un foro passante di diametro 6 mm. La funzionalità di questo foro è di permettere il passaggio della vite di fissaggio delle pale ai bracci. Si ricorda che è possibile tramite questa vite che funge da perno variare l'angolo di attacco β del profilo. La variazione di β è compresa tra 0° e 360° .



93. Particolare del serraggio dei bracci B.

Il serraggio dei bracci B avviene mediante lo stringimento dei dadi esterni alla centina una volta impostato l'angolo di attacco desiderato.

La soluzione adottata è la più semplice studiata. Difatti permette tramite il serraggio di un solo dado la variazione dell'incidenza del profilo, non necessitando di strumenti particolari ma solo di un goniometro ed una chiave metrica numero 12.

La posizione a β uguale a 0° corrisponde ad un angolo di 90° della corda rispetto al braccio.

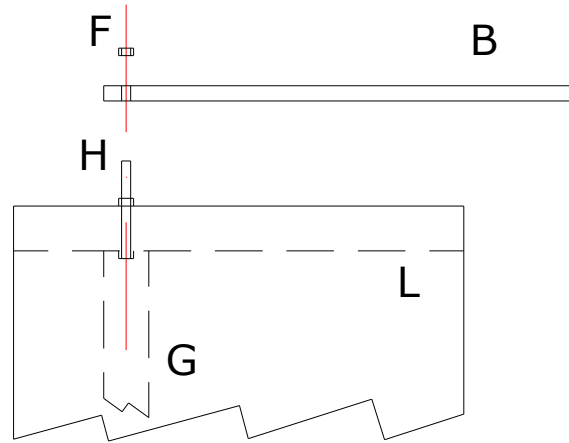
Gli angoli positivi sono misurati in senso orario, gli angoli negativi in senso antiorario partendo dalla posizione di angolo di attacco nullo.

In seguito è stata realizzata un'incastellatura con vecchie travi in acciaio per consentire il posizionamento del VentolOne e per le successive prove. Tale soluzione è presente solo a carattere temporaneo e non definitivo.

Una volta definita la conformazione strutturale definitiva del VentolOne si cercherà la soluzione appropriata per la base dello stesso.

11.3.2.3 Montaggio.

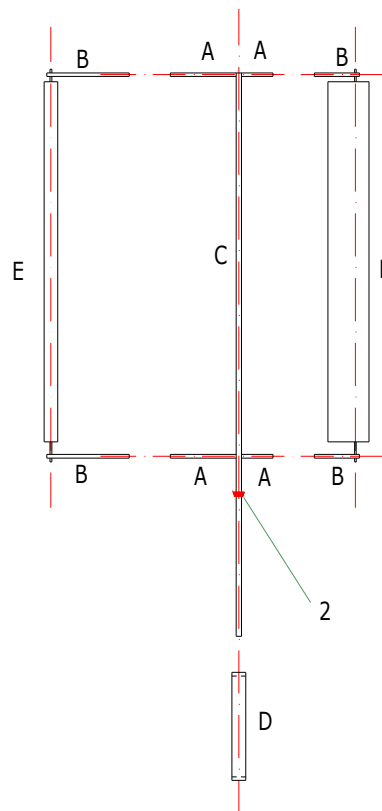
Una volta completata la costruzione di tutti gli elementi si è proceduto al montaggio della turbina. La prima operazione è montare il braccio B sul profilo ed avvitare il dado di serraggio F alla vite passante H senza stringere, in modo da consentire il movimento al braccio.



94. Schema di montaggio braccio B all'ala.

In figura si può notare come il longherone G sia fissato alla centina L.

Il procedimento di montaggio è il medesimo per i restanti 5 bracci.

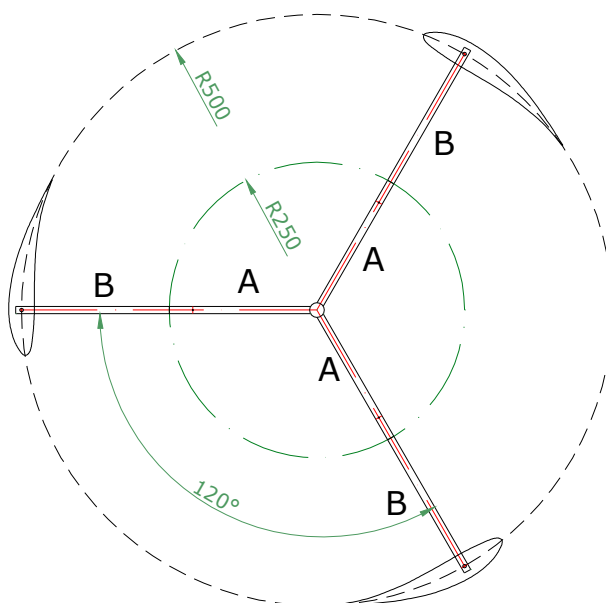


95. Esploso del VentolOne 1.1.

Le lettere indicano i vari elementi di cui è composto il VentolOne 1.1:

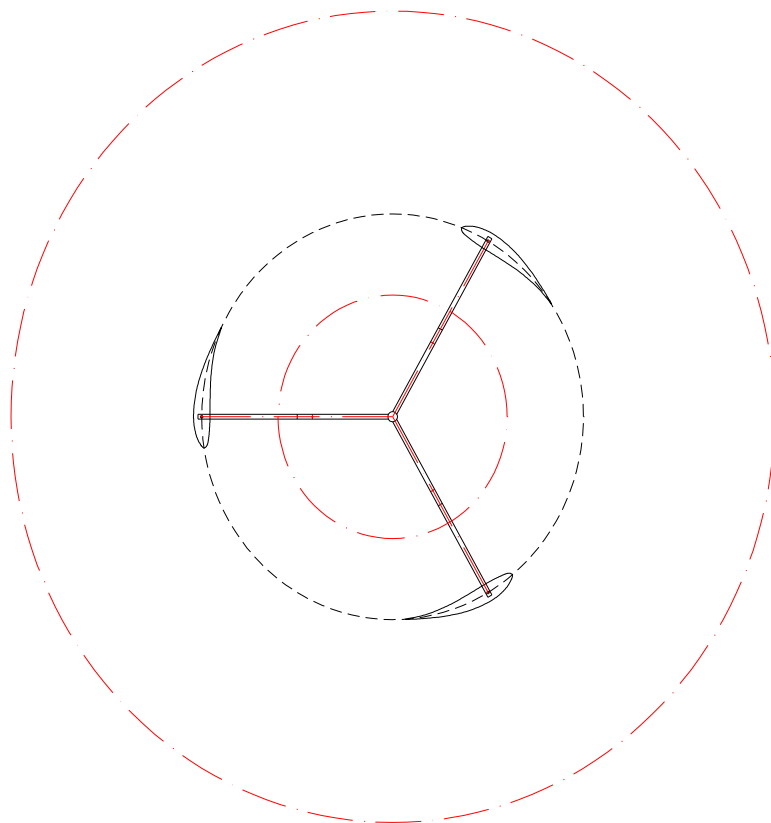
A	braccio A
B	braccio B
C	corpo centrale
D	statore
E	pale
F	dado di serraggio
G	longherone
H	vite di regolazione angolo di attacco
L	centina
2	cuscinetto conico a rulli

Completata l'operazione per tutte le ali si è passati all'inserimento del corpo centrale C nello statore D previa ingrassatura dei cuscinetti conici a rulli. L'operazione di ingrassatura va effettuata prima di inserire il corpo centrale nello statore poiché in seguito non si avrebbe lo spazio necessario per compiere agevolmente ed in maniera completa la lubrificazione dei cuscinetti.



96. Vista dall'alto del VentolOne 1.1.

Inserito il rotore nello statore si procede al montaggio delle pale collocando il braccio B nel braccio A solidale al rotore ed impostando il diametro voluto. Ovviamente la distanza delle pale dal rotore deve essere la medesima.



97. *Diametro minimo e diametro massimo del VentolOne 1.1.*

In caso contrario il VentolOne sarebbe squilibrato con il rischio di aumentare a tal punto le vibrazioni da provocare una deformazione permanente o una rottura al rotore.

In seguito si procede andando a definire l'angolo di attacco β delle pale e stringendo il dado F.

Il VentolOne è stato in seguito montato sull'incastellatura appositamente creata per sostenerlo.

Si ricorda che la soluzione è puramente a carattere provvisorio e non definitivo.

Questo tipo di sostegno ha il solo scopo di permettere l'alloggiamento necessario per le prove statiche e dinamiche.



98. *VentolOne 1.1.*

Una volta fissato il VentolOne all'incastellatura si è proceduto a montare la puleggia nel tratto di rotore sporgente dallo statore.

Sull'incastellatura è stato realizzato un alloggiamento per un alternatore da automobile collegato con una cinghia alla puleggia.



99. *Accoppiamento puleggia-cinghia-alternatore.*

11.3.2.4 *Tabella riassuntiva dimensioni VentolOne 1.1:*

DIMENSIONI COMPLESSIVE		
Diametro	Φ	800 mm < Φ < 2000 mm
Altezza totale	h	1680 mm
Numero di pale	n	3
Superficie alare	S	0,30 m ²
Tip speed ratio stimata	λ	3÷4
Solidità		0,9
PALE		
profilo		
Lunghezza della pala	l	1000 mm
Corda alare	c	300 mm
Allungamento alare	λ_a	3,33
Freccia massima	f	15,45 mm
Distanza % c dal bordo d'attacco		34,6
Spessore massimo	s	43,8 mm
Distanza % c dal bordo d'attacco		25
Perimetro		660 mm
Spessore centina		30 mm
Materiale		Compensato 11 strati, nuovo
longherone		
Dimensioni		940 X 30 mm
Spessore		2 mm
Distanza saldature		80 mm
Dimensioni linguetta		40 X 30 mm
Materiale		Acciaio dolce, scarto
rivestimento		
Dimensioni		1000 X 660 mm
Area		0,66 m ²
Spessore		0,7 mm
Materiale		Alluminio, scarto
STATORE		
Diametro esterno	Φ_e	60 mm
Diametro interno	Φ_i	54 mm
Altezza	h	350 mm
Materiale		Acciaio, scarto

cuscinetti		
Diametro esterno	Φ_e	56 mm
Diametro interno	Φ_i	28 mm
Altezza	h	15 mm
Tipologia		Conici a rulli
ROTORE		
Diametro corpo centrale	Φ_{cc}	26,6 mm
Lunghezza	h	1680 mm
Diametro bracci A	Φ_{bA}	25 mm
Diametro bracci B	Φ_{bB}	21 mm
Diametro vite di serraggio bracci	Φ_{vs}	6 mm

11.3.3 Prove statiche.

Per prove statiche si intendono le prove realizzate a terra senza l'ausilio di vento prodotto artificialmente.

Una volta assemblata la macchina è stata posta in rotazione manualmente per effettuare un primo controllo di stabilità.

La struttura non ha evidenziato alcun problema e le vibrazioni presenti non sono da considerarsi tali da dover applicare modifiche alla struttura.

La movimentazione tramite spinta manuale è stata eseguita per 10 minuti circa.

Fermato il VentolOne si è proceduto al controllo del serraggio di tutte le viti e tutti i bulloni presenti. Il controllo ha dato esito positivo, nessun bullone e nessuna vite hanno mostrato alterazioni nel serraggio o nel posizionamento.

Eseguito il primo controllo il VentolOne è stato posizionato in una zona dove è presente una corrente d'aria costante nell'ordine dei 3-4 m/s, pari al II e III grado della scala Beaufort.

La prova ha lo scopo di verificare l'avviamento da fermo della turbina a venti deboli e costanti.

Non sono state effettuate rilevazioni di misura in quanto la prova ha solo lo scopo di verificare il corretto funzionamento e non le prestazioni della turbina.

La prova è visibile su www.inventiamoci1sviluppo.wordpress.com oppure al link <http://www.youtube.com/watch?v=RlgG2bKjIyo>

11.3.3.1 Condizioni di svolgimento della prova statica.

luogo	Savigliano (CN)
altitudine	321 m.s.l.m
data	4 aprile 2009
velocità vento v	3÷4 m/s
grado della scala Beaufort	II÷III
temperatura aria T	22°C
Re	80100

11.3.3.2 Svolgimento della prova.

Il VentolOne è stato posizionato in una zona dove è presente costantemente una corrente ventosa.

Il rotore è stato fermato regolando l'angolo di attacco β a 0°.

Non è stata applicata nessuna forza esterna.

11.3.3.3 Risultati.

Il VentolOne in presenza di vento si è auto-avviato girando dapprima lentamente per poi acquistare velocità angolare e raggiungere la sua velocità di esercizio, stimata in 70 giri/min.

Di conseguenza:

v	3 m/s
u_{apice}	3,6 m/s
λ	1,2

Aumentando sensibilmente la velocità del vento si è potuto assistere ad un incremento abbastanza rapido della velocità angolare. I dati rilevati dall'osservazione della prova in condizioni di picco sono i seguenti:

v_{picco}	4 m/s
$u_{apice-picco}$	5,2 m/s
λ_{picco}	1,3

Il tempo di avviamento è nell'ordine dei 2 minuti, mentre il tempo necessario al VentolOne 1.1 per raggiungere la velocità di esercizio è di 5 minuti.

Da una prima analisi di questi pochi dati si è potuto capire come all'aumentare della velocità del vento si assista ad un incremento della velocità palare del VentolOne.

Inoltre la *tip speed ratio* λ a venti di scarsa intensità cresce di 0,1 ogni m/s in più fornito dal vento.

Tramite l'analisi di tabelle (vedi figura 16.) è stato possibile stimare la potenza che il VentolOne potrebbe estrarre dalla corrente ventosa.

Per valori di λ pari a $1,2 \div 1,3$ è ottenibile un coefficiente di potenza rotorico C_{pr} pari a 0,2.

Si è potuta stimare la potenza estraibile ed anche il numero di giri al minuto previsti.

Le equazioni usate sono:

$$13 \quad P_e = C_{pr} \frac{1}{2} \rho A v^3 [W]$$

$$48 \quad rpm = 19 v \frac{\lambda}{2 r}$$

La formula usata per il calcolo delle rivoluzioni al minuto è di natura empirica. Ne è stata confermata la validità in queste prime prove, valutando l'errore commesso trascurabile.

L'equazione non viene usata per i calcoli di natura progettuale ma solo ed esclusivamente per avere una stima delle prestazioni del rotore a seconda della velocità e delle sue caratteristiche geometriche.

La stima di potenza estraibile e velocità del rotore ha tenuto conto dei seguenti parametri:

$V_{\min}$	0 m/s
$V_{\max}$	14 m/s
ΔV	0,5 m/s
C_{pr}	0,3
λ	1,2
r	0,5 m

Dalla risoluzione delle equazioni ad incrementi di 0,5 m/s si ottengono i seguenti valori:

velocità vento (m/s)	potenza estratta (W)	rpm
0,00	0,00	0,00
0,50	0,02	19,00
1,00	0,18	38,00
1,50	0,62	57,00
2,00	1,47	76,00
2,50	2,87	95,00
3,00	4,96	114,00
3,50	7,88	133,00
4,00	11,76	152,00
4,50	16,74	171,00
5,00	22,97	190,00
5,50	30,57	209,00
6,00	39,69	228,00
6,50	50,46	247,00
7,00	63,03	266,00
7,50	77,52	285,00
8,00	94,08	304,00
8,50	112,85	323,00
9,00	133,95	342,00
9,50	157,54	361,00
10,00	183,75	380,00
10,50	212,71	399,00
11,00	244,57	418,00
11,50	279,46	437,00
12,00	317,52	456,00
12,50	358,89	475,00
13,00	403,70	494,00
13,50	452,09	513,00
14,00	504,21	532,00

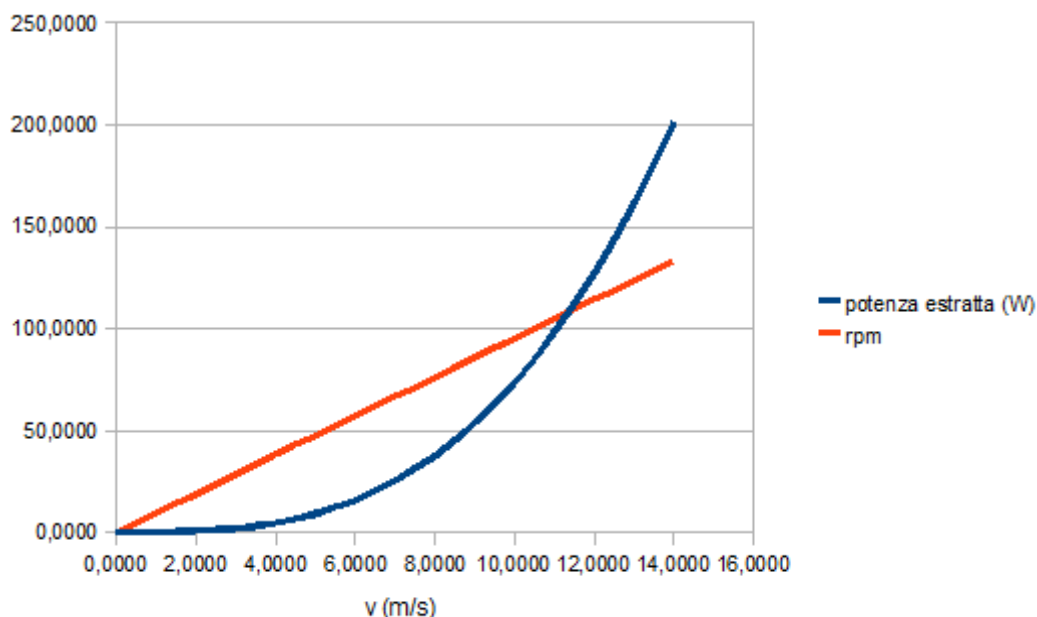
11 *Valori di potenza estraibile e rivoluzioni al minuto stimati.*

Dai dati ricavati è possibile notare come la produzione di energia comincia a diventare abbastanza significativa intorno ai 4,5 m/s, producendo circa 17 W.

Il calcolo è eseguito fino a 14 m/s, cioè fino al VII grado della scala Beufort. Oltre a questi VII grado della scala Beufort si ha la possibilità che il vento arrechi danni a tetti e strutture in

generale, per cui non ha senso spingersi oltre nei calcoli.

La stima grafica di potenza e velocità di rotazione riguardanti il VentolOne 1.1 è la seguente:



100. Stima potenza estraibile e rivoluzioni per minuto.

I dati ottenuti serviranno in seguito come confronto per le prove successive.

11.3.3.4 **Commenti.**

Conclusa la prova statica, e appurata la solidità della struttura, si è proceduto ad un controllo degli elementi che compongono il VentolOne 1.1.

I problemi emersi sono i seguenti:

- apertura del bordo di uscita dei profili;
- presenza di crepe su una centina;
- difficoltà nello sfilare i bracci B dai bracci A.

Apertura del bordo di uscita.

Il bordo di uscita dei profili durante la prima prova è stato volontariamente chiuso con del nastro isolante del tipo da elettricista.

La decisione è stata presa con l'intento di rendere più accessibile ad eventuali riparazioni l'interno del profilo.

Questa soluzione ha presentato due problemi:

il primo è la generazione di turbolenze eccessive che hanno avuto come conseguenza un notevole calo dell'efficienza del profilo alare.

Il secondo è la mancata aderenza del rivestimento alla sagoma impostagli dal profilo con ovvie perdite di efficienza ed aumento della resistenza sulle pale.

Sono stati quindi applicati sul bordo di uscita delle pale tre rivetti aeronautici in alluminio alla distanza di 250 mm l'uno dall'altro.



101. Bordo di uscita.

Per mezzo della chiusura del bordo di uscita del profilo si è potuto avere un flusso dell'aria intorno alla pala più pulito. Inoltre il rivestimento ricalca la forma del profilo.

Presenza di crepe su una centina.

Su una centina è stata riscontrata la presenza di una crepa oltre al parziale staccamento di pezzi dalla centina stessa. Le altre centine risultavano essere in perfette condizioni.



102. Presenza di crepe sulla centina.

La crepa è quindi da considerarsi un difetto di fabbricazione del materiale e non un problema

imputabile alla costruzione del VentolOne.

Il guasto è stato riparato con della colla ad alta resistenza specifica per il legno.

È stata comunque presa in considerazione l'ipotesi di sostituzione del compensato multistrato con altri tipi di legno. Peraltro nei PVS è probabilmente di più facile reperibilità il legno che il compensato.

Difficoltà nello sfilare i bracci B dai bracci A.

Uno degli obiettivi principali riguardanti la costruzione del VentolOne è la facilità di montaggio/smontaggio.

Si è dunque proceduto a limare ulteriormente i bracci B in modo che essi possano facilmente essere inseriti nei bracci A.

L'operazione di limatura è avvenuta manualmente con l'ausilio di carta vetrata.

Il problema è stato risolto senza ulteriori lavorazioni.

11.3.4 Prove dinamiche.

Superate le prime prove statiche si è reso necessario valutare le prestazioni del VentolOne 1.1 alle condizioni di reale utilizzo.

Le prove dinamiche consistono in prove aerodinamiche aventi lo scopo di studiare il comportamento reale delle forze che si generano tra il contatto del fluido reale, l'aria, ed un corpo, il VentolOne.

Le forze già citate nel paragrafo “*Turbine eoliche a portanza*” sono in funzione della velocità relativa del fluido rispetto al corpo, e si annullano quando si annulla il moto relativo che le ha generate.

Le prove effettuate si basano quindi sul **principio di reciprocità**.

Il principio di reciprocità afferma che “*le azioni aerodinamiche saranno le stesse sia che il corpo si muova nel fluido in quiete oppure che il corpo immobile sia immerso in una corrente di uguale velocità.*” (Lardinelli, 1992).

Questo principio è alla base di tutte le gallerie del vento, dove vengono studiati i flussi aerodinamici intorno ai corpi presi in esame.

In questo caso il corpo è vincolato al terreno e tramite potenti ventole si imprime la velocità desiderata alla corrente di aria.

Le gallerie del vento permettono di immagazzinare dati tramite appositi sensori rendendo l'analisi precisa ed efficace.

Ovviamente in galleria del vento si dovranno ricreare le stesse condizioni di utilizzo del corpo in esame; in particolar modo in galleria del vento si deve tener conto del numero di Reynolds, in quanto non si dispone di una vena fluida indefinita ma perturbata dalle pareti della galleria stessa.

Più ci si avvicina alle reali condizioni di utilizzo più i risultati sono attendibili.

Una seconda strada è muovere il corpo in un fluido fermo.

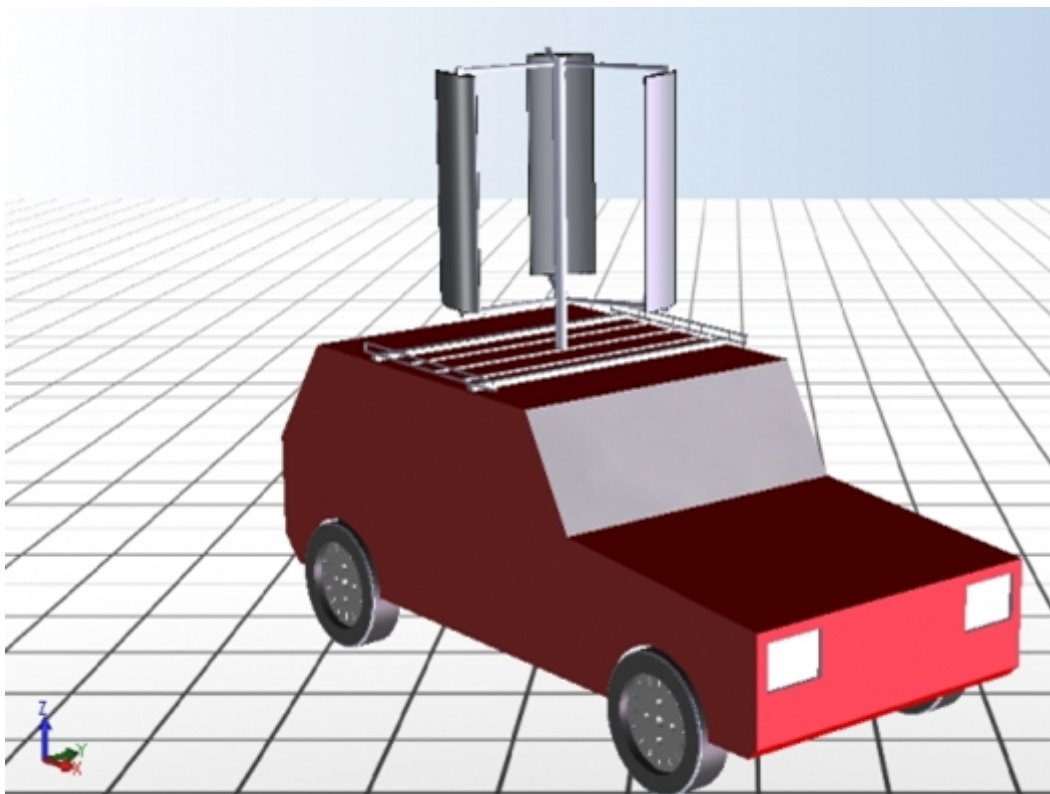
Con le prove dinamiche si vogliono valutare i seguenti parametri alle diverse velocità del vento:

- λ in fase di avvio ed in fase di esercizio;
- numero di giri del VentolOne;
- resistenza della struttura;
- potenza prodotta.

Una volta definiti i parametri da monitorare sono state definite le modalità di prova. In un primo momento la scelta si è orientata sull'utilizzo di gallerie del vento.

Purtroppo visti i costi di utilizzo delle gallerie del vento contattate si è preferito orientarsi su un'altra scelta: muovere il VentolOne in una massa di aria ferma.

Per ottenere questa applicazione del principio di reciprocità si è proceduto montando il VentolOne sul tetto di una Fiat Panda viaggiando alle velocità prestabilite.



103. Simulazione grafica delle prove dinamiche.

Questa applicazione si è resa necessaria in quanto i costi di una giornata in una galleria del vento, anche di piccole dimensioni, rappresentano una cifra assolutamente non compatibile con lo spirito del progetto.

Ovviamente questa non è la soluzione ottimale dal punto di vista della misurazione. Tuttavia i valori che presumiamo siano ottenibili anche in presenza delle inevitabili turbolenze che l'automobile genererà siano ragionevolmente compatibili con le condizioni di turbolenza reali del vento tra le case o lungo un terreno un po' accidentato.

Inoltre, tra la possibilità di testare il VentolOne tra qualche anno in qualche galleria del vento universitaria o privata, con spese ampiamente al di sopra delle possibilità attuali, e la possibilità di avere dati reali da subito ha fatto propendere per la scelta della prova con l'automobile.

Un vantaggio della prova svolta con questa modalità è l'assenza di fattori correttivi nei calcoli.

Difatti le dimensioni dell'oggetto testato sono le medesime dell'oggetto reale, quindi in scala 1:1, inoltre si dispone di una vena fluida praticamente infinita che permette di lavorare con numero di Reynolds identici ai valori reali.

Siccome il fluido nel quale si muove il VentolOne è un fluido reale non occorrono correttivi per quanto riguarda temperatura, densità e pressione dell'aria.

Il luogo scelto per effettuare le prove è stato l'Aeroclub Adele Orsi di Calcinate del Pesce (VA) in quanto disponibile a concedere la pista in modo totalmente gratuito.

La pista della lunghezza di 600 m ha permesso lo svolgimento “run” sufficientemente lunghi tali da consentire l'acquisizione di dati in quantità rilevante e continua, condizione indispensabile per poter valutare i parametri sopraindicati.

Per run si intende l'attraversamento di tutta la lunghezza della pista.

Le prove hanno inoltre l'obiettivo di stabilire l'assetto migliore per determinate classi di velocità di vento prevalente. In questo modo è possibile ottimizzare il funzionamento del VentolOne a seconda delle condizioni di ventosità presenti sul sito nel quale si vuole prevedere l'installazione della macchina.

È quindi possibile variare le dimensioni del rotore, aumentando o diminuendo il diametro, e variare l'angolo di attacco delle pale in un range di 360°.

La versatilità del VentolOne vuole essere una delle caratteristiche principali in modo che sia capace di seguire le caratteristiche del vento e del sito dove viene installato.

11.3.4.1 Condizioni di svolgimento della prova dinamica.

luogo	Calcinate del Pesce (VA) Aeroclub Adele Orsi, ACAO
altitudine	243 m.s.l.m
lunghezza pista	600 m
orientamento	decollo da Est ad Ovest
data	16/06/2009
velocità vento v	1÷2 m/s
direzione vento	O-NO
grado della scala Beufort	I
temperatura aria T	27°C
condizioni meteo	soleggiato per tutta la durata delle prove
Re	40297



104.Campo di volo di Calcinate del Pesce, ACAO.

La presenza di vento non è andata ad influire sui risultati ottenuti nei test in quanto si è sempre tenuto conto della velocità assoluta del vento.

11.3.4.2 *Strumenti di misurazione.*

Per andare a definire λ e potenza del VentolOne si è reso indispensabile misurare:

- velocità del vento;
- velocità di rotazione del VentolOne.

Per effettuare le misurazioni necessarie gli strumenti utilizzati sono stati:

- tachimetro da bicicletta;
- anemometro digitale a coppette.

Gli strumenti di misurazione sono stati alloggiati sull'incastellatura del VentolOne, nel seguente modo:

Tachimetro da bicicletta.

Si compone di un sensore a calamita solidale al corpo rotante, un sensore fisso che legge il passaggio del sensore a calamita, ed un display dove vengono visualizzati i dati restituiti dai sensori.

Il sensore a calamita è stato posto a 343 mm dall'asse verticale di rotazione. I valori di velocità restituiti in chilometri orari (km/h) sono i valori di velocità che avrebbe avuto una ruota della circonferenza di 3694,1 mm. Volendo ricavare la velocità u_{apice} della pala si è reso necessario effettuare una conversione dei valori di velocità.

Data la lunghezza esigua del cavo del tachimetro si è reso necessario fissare il display all'incastellatura.

La misurazione effettuata dal tachimetro è la velocità di rotazione del VentolOne.

Anemometro.

L'anemometro a disposizione è un anemometro a coppette. Vista l'impossibilità di far arrivare il display del tachimetro nell'abitacolo dell'autovettura si è preferito fissarlo all'incastellatura. In questo modo la lettura dei dati restituiti dai due strumenti di misura poteva avvenire contemporaneamente.

La misurazione effettuata dall'anemometro tiene quindi conto della velocità del vento e della velocità dell'auto.



105. Disposizione degli strumenti di misurazione.

Dalla figura si possono distinguere:

- 1- sensore a calamita;
- 2- sensore fisso;
- 3- display del tachimetro;
- 4- anemometro.

La rilevazione dei dati avviene tramite trascrizione manuale dei valori restituiti dai due strumenti di misura.

L'operatore deve restare seduto sulla portiera all'esterno dell'abitacolo opportunamente vincolato.

Non è assolutamente la soluzione migliore, in quanto esistono strumenti che permettono la digitalizzazione dei dati ad intervalli molto ristretti, talvolta anche nell'ordine dei decimi di secondo. Questi sistemi hanno un'errore molto ridotto oltre al grosso vantaggio di poter

usufruire di una quantità di dati decisamente elevata.

L'intervallo di misurazione di ogni dato è di 1 secondo.

L'errore a cui ovviamente sono soggette le misurazioni non impedisce tuttavia di valutare il funzionamento del VentolOne.

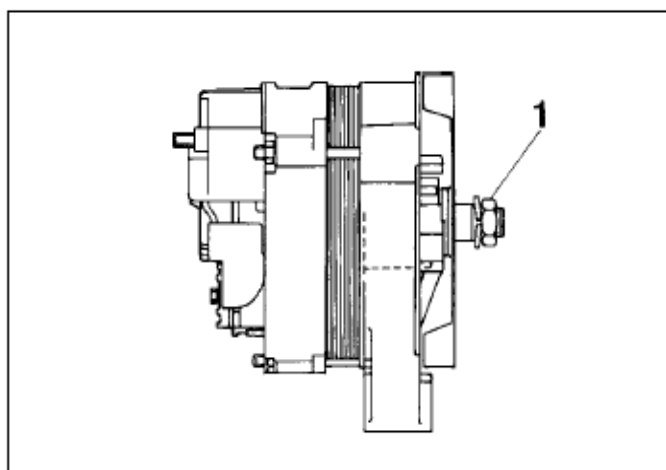
11.3.4.3 Svolgimento della prova.

Montata la bagagliaia sul tetto dell'automobile si è provveduto ad installare il VentolOne 1.1 nel seguente ordine:

- incastellatura e statore;
- rotore;
- pale;
- puleggia ed alternatore;
- strumenti di misurazione.

È stato previsto il montaggio di un alternatore per simulare un carico e contemporaneamente per valutare una prima ipotesi di trasmissione del moto, consci che un rapporto 15:1 era presumibilmente inattuabile.

L'alternatore è un Magneti Marelli AA125R 14V 45A proveniente da una Fiat Panda.



Alternatore Marelli, tipo AA 125 R 14V 45A

Caratteristiche:

Tensione nominale	= 14V
Corrente nominale	= 45A
Velocità massima	= 14000 giri/1'
Velocità massima di picco (per 15")	= 15000 giri/1'
Cuscinetto lato comando	= 6203-2Z
Cuscinetto lato collettore	= 6201-2Z/C3
Regolatore di tensione	= RTT 119 A
Senso di rotazione orario	

Nota: Lubrificare i due cuscinetti con grasso per le alte temperature.
Serrare il dado **1** a 60 Nm.

167

106.Caratteristiche alternatore.¹²

L'utilizzo di un alternatore di recupero in dotazione ad un'automobile può sembrare una scelta al ribasso e a livello hobbystico: invece, al di là degli innegabili vantaggi economici (anche l'alternatore è materiale di recupero avuto gratuitamente) pare la soluzione più semplice e

¹² Figura 106.Manuale di riparazione Motori serie LGW 523-627 e LGW 627 GPL

pratica e di effettiva realizzabilità.

La trasmissione è ottenuta attraverso due pulegge, l'una sull'alternatore stesso (diametro 30mm), l'altra solidale al rotore (diametro 460mm) che garantiscono un rapporto di trasmissione di circa 15:1.

Le prove consistono nella percorrenza alle velocità richieste della pista. Ogni run consente l'acquisizione di 35 dati in caso di velocità 7 m/s fino ad arrivare a 22 nel caso di velocità 11 m/s. Ogni run ha uno spazio utile di 500 m, in quanto l'automobile a fine pista deve necessariamente rallentare e compiere una sterzata di 180° per invertire la direzione. Il cambio di direzione avveniva sempre sterzando verso destra per prevenire la caduta dell'operatore incaricato alla lettura dei dati.

Ogni prova comprendeva 4 run per un totale di 2000 m utili.

Prima dell'effettuazione delle prove vere e proprie sono stati svolti 4 run di collaudo per verificare la solidità della struttura. È stata raggiunta la velocità limite di 16 m/s (57,6 km/h).

Le prove effettuate hanno avuto le seguenti combinazioni:

Caso	Velocità – v – m/s	Angolo di attacco – β - °	Alternatore
A	0 – 2	0	scollegato
B	0 – 2	0	collegato
C	7	5	scollegato
D	7	5	collegato
E	10	0	Scollegato
F	10	5	scollegato

12

Combinazioni svolte durante le prove.

11.3.4.4 Risultati.

CASO A

v 0 – 2 m/s

β 0°

Φ 1 m

alternatore scollegato

Tramite questa prova si vuole valutare l'avviamento del VentolOne in assenza di una coppia di spunto fornita manualmente o in maniera artificiale.

In questo caso non si è reso necessario lo svolgimento dei 4 run previsti in quanto la velocità

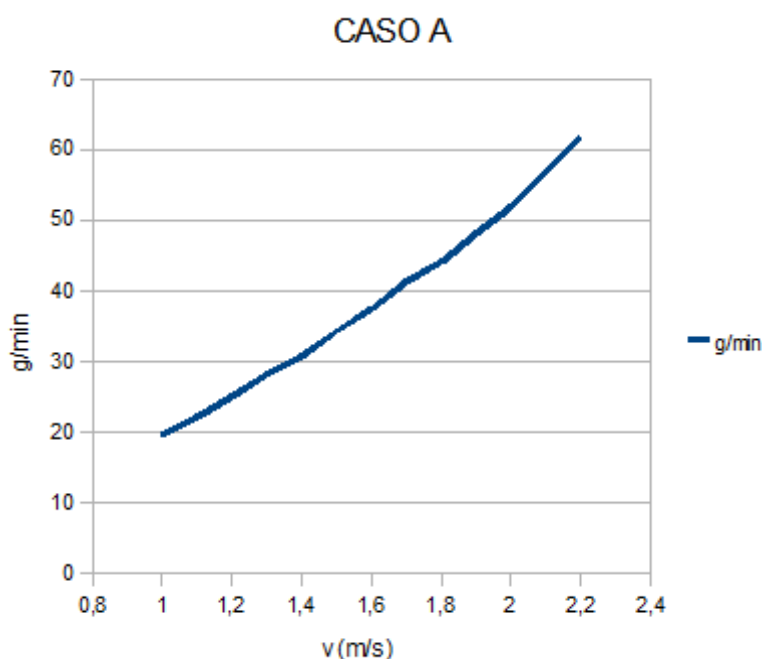
del vento già presente in loco si è dimostrata sufficiente per questo tipo di prova.

Non è stato possibile ricavare valori numerici in quanto il tachimetro da bicicletta non è capace di leggere valori di velocità così bassi. Le misurazioni sono state effettuate contando i passaggi di una pala segnata in un minuto.

Si è potuto osservare come anche a velocità basse il VentolOne si aziona, superando di poco una u_{apice} di 2m/s.

Conseguentemente è stato possibile calcolare il valore di λ , che si attesta sempre intorno all'unità.

Le prove ricalcano i risultati ottenuti durante le prove statiche.



107. Variazione dei g/min in funzione della velocità del vento.

È possibile quindi concludere che a velocità del vento molto basse ed in assenza di carico il VentolOne “sente” l'azione del vento ma necessita di un tempo lungo per raggiungere una velocità di rotazione significativa.

Dal grafico è possibile notare come per velocità del vento molto basse l'aumentare del numero di giri assuma un andamento pressoché lineare, dovuto all'incremento quasi lineare dei valori di λ .

Una progressione di questo tipo è giustificata da un avviamento della macchina molto lento come quello del VentolOne.

I valori di λ arrivano ad un massimo di 1,01.

v vento (m/s)	u_{apice} (m/s)	λ	Velocità di rotazione	
			rad/sec	g/min
1,00	0,70	0,70	2,04	19,49
1,10	0,79	0,72	2,31	22,05
1,20	0,90	0,75	2,62	25,06
1,30	1,01	0,78	2,96	28,24
1,40	1,11	0,79	3,22	30,80
1,50	1,23	0,82	3,58	34,25
1,60	1,34	0,84	3,92	37,43
1,70	1,48	0,87	4,31	41,18
1,80	1,58	0,88	4,62	44,11
1,90	1,73	0,91	5,04	48,15
2,00	1,86	0,93	5,42	51,79
2,10	2,04	0,97	5,94	56,72
2,20	2,22	1,01	6,48	61,87

13

Tabella riassuntiva CASO A.

CASO B

v	0 – 2 m/s
β	0°
Φ	1 m
alternatore	collegato

Lo svolgimento di questa prova ha come obiettivo valutare l'avviamento del VentolOne in presenza di un carico. Non sono state effettuate prove al fine di valutare la potenza estratta dall'alternatore.

Anche in questo caso non sono stati effettuati i 4 run previsti, poiché l'intensità del vento era sufficiente per la realizzazione del test.

Il VentolOne in presenza di un carico e a velocità del vento così basse, non riesce a trasformare l'energia presente nel vento in coppia di spunto sufficiente per avviarsi.

Il test ha così fornito un'indicazione molto importante per le successive migliorie alla macchina eolica.

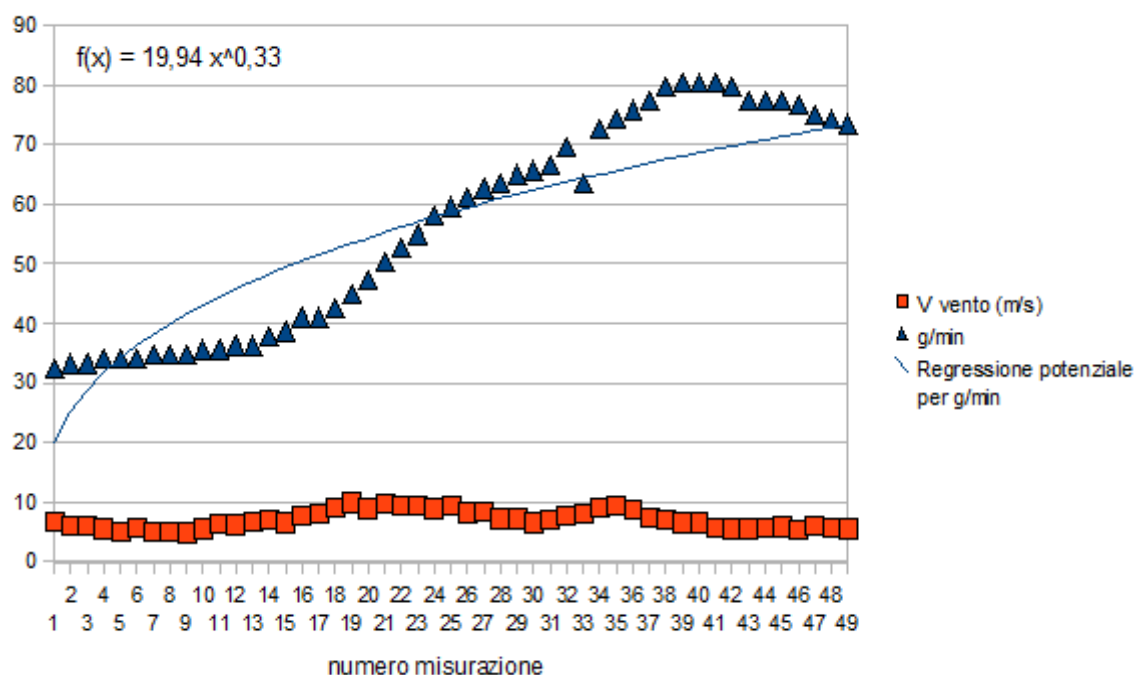
CASO C

v	7 m/s
β	5°
Φ	1 m
alternatore	scollegato

Tramite la prova in questione si è voluto valutare l'avvio della turbina eolica con venti di 25 km/h, appartenenti al III grado della scala Beufort. Si è voluto indagare il comportamento del VentolOne con questa tipologia di venti poiché risultano essere i più diffusi ed i più probabili su vaste aree del pianeta.

Sono state eseguite rilevazioni anche al di sopra dei 7 m/s poiché durante la prova si è assistito alla presenza di piccole folate di 3÷4 m/s.

La prova ha anche come fine la valutazione su quanto la macchina eolica riesca a mantenere costante la rotazione in presenza di vento, andando ad individuare il limite in condizioni di brezza tesa.



108. Rappresentazione grafica CASO C.

È stato effettuato un primo run con partenza da fermo per valutare l'avviamento del VentolOne e successivamente sono stati effettuati i quattro run per simulare le condizioni di utilizzo.

Il grafico precedente riassume la variazione della velocità di rotazione del VentolOne in funzione della velocità del vento. L'asse delle X sono indicate le misurazioni, sull'asse delle Y il valore corrispondente alla velocità di rotazione in giri al minuto.

Dall'analisi del grafico è possibile notare come la turbina presenti difficoltà nell'avviamento fino a quando raggiunge il valore di 40 giri al minuto, dopo di che aumenta la sua rotazione con andamento quadratico fino ad arrivare ad un massimo di 80,5 giri al minuto.

Il brusco calo del numero di giri è dovuto ad una manovra di inversione non perfettamente riuscita. Si può comunque constatare una notevole reattività della macchina nel riprendere la

velocità di rotazione precedente.

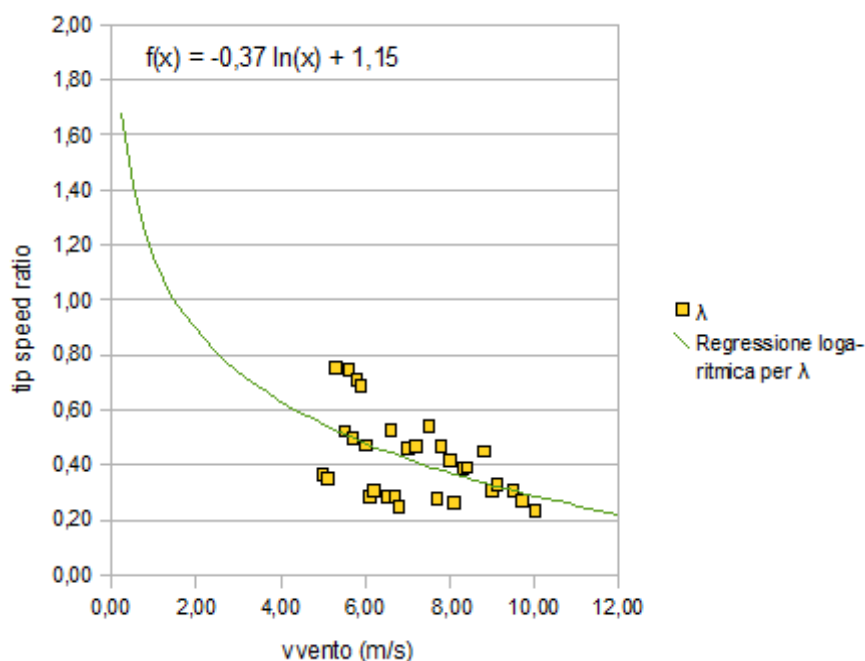
È stata creata una regressione potenziale per i valori di rotazione al fine di simulare la condizione ottimale di funzionamento del VentolOne.

Per valori di velocità del vento prossimi ai 7 m/s la linea di funzionamento ottimale ha come equazione:

$$^{49} \quad g/min(v) = 19,94 x^{0,33}$$

Risulta quindi una propensione della macchina a lavorare oltre i 40 giri al minuto in quanto la rotazione non subisce brusche variazioni.

La velocità di rotazione media si attesta intorno a 56,5 giri/min.



109. Andamento di $\lambda(v)$ CASO C.

Analizzando l'andamento di λ in funzione della velocità del vento e confrontandolo con i valori espressi nella tabella successiva si evince una diminuzione consistente del suo valore numerico all'aumentare della velocità del vento, andamento del tutto inusuale.

Non si sono riusciti a raggiungere i valori di tip speed ratio raggiunti in fase di avviamento anche se teoricamente possibili come dimostra la regressione logaritmica.

Come verrà spiegato in seguito tale fenomeno è da ricercarsi nella rotazione delle pale attorno alla vite di regolazione dell'angolo di attacco, indicata precedentemente con la lettera H.

E' stata definita in questo caso la regressione logaritmica, espressione dell'andamento ottimale di $\lambda(v)$.

L'equazione caratteristica è la seguente:

$$^{50} \quad \lambda(v) = -0,37 \ln(x) + 1,15$$

Il massimo valore di λ ottenuto è 0,73 a 80,5 giri/min, molto minore di quanto ipotizzato.

v vento (m/s)	u _{apice} (m/s)	λ	velocità di rotazione	
			rad/sec	giri/min
5,00	1,82	0,36	3,64	34,81
5,10	1,78	0,35	3,56	34,03
5,30	4,01	0,76	8,02	76,58
5,50	2,88	0,52	5,77	55,11
5,60	4,17	0,74	8,34	79,67
5,70	2,83	0,50	5,67	54,15
5,80	4,13	0,71	8,26	78,90
5,90	4,05	0,69	8,10	77,35
6,00	2,83	0,47	5,67	54,15
6,10	1,74	0,29	3,48	33,26
6,20	1,90	0,31	3,81	36,36
6,50	1,86	0,29	3,72	35,58
6,60	3,47	0,53	6,94	66,33
6,70	1,90	0,28	3,81	36,36
6,80	1,70	0,25	3,40	32,48
7,00	3,21	0,46	6,42	61,37
7,20	3,36	0,47	6,72	64,20
7,50	4,05	0,54	8,10	77,39
7,70	2,15	0,28	4,30	41,08
7,80	3,64	0,47	7,28	69,55
8,00	3,32	0,42	6,64	63,44
8,10	2,15	0,27	4,30	41,08
8,30	3,20	0,39	6,40	61,15
8,40	3,28	0,39	6,56	62,68
8,80	3,97	0,45	7,94	75,86
9,00	2,75	0,31	5,51	52,60
9,10	3,02	0,33	6,03	57,63
9,50	2,91	0,31	5,83	55,69
9,70	2,63	0,27	5,26	50,25
10,00	2,35	0,24	4,70	44,90

14

Tabella riassuntiva CASO C.

La tabella riassuntiva esplicita i valori medi ottenuti durante le rilevazioni per ciascuna classe di velocità.

Durante la prova sono stati raggiunti gli 80,5 giri/min senza alcun problema di stabilità della struttura. Ovviamente le vibrazioni sono aumentate all'aumentare della velocità simulata del vento tuttavia non hanno provocato cedimenti strutturali alla struttura, alle saldature ed alle giunzioni della macchina.

Le vibrazioni hanno causato problemi di natura aerodinamica che verranno espletati successivamente.

CASO D

v	7 m/s
β	5°
Φ	1 m
alternatore	collegato

Mediante la prova seguente si è voluto studiare l'accoppiamento del VentolOne con l'alternatore per venti comuni.

La prova consiste nell'avvio da fermo della turbina e successivamente nella conclusione dei quattro run previsti.

Non sono state effettuate prove al fine di valutare la potenza estratta dall'alternatore.

La prova ha dato esito negativo in quanto sotto carico la turbina non riusciva a superare la fase di avvio, nemmeno al termine dei quattro run previsti. Per via della rotazione estremamente ridotta non è stato possibile ricavare dati sufficienti per la creazione di un grafico esemplificativo della situazione.

La velocità di rotazione del VentolOne durante questa prova non ha mai superato i 20 giri/min.

CASO E

v	10 m/s
β	0°
Φ	1 m
alternatore	scollegato

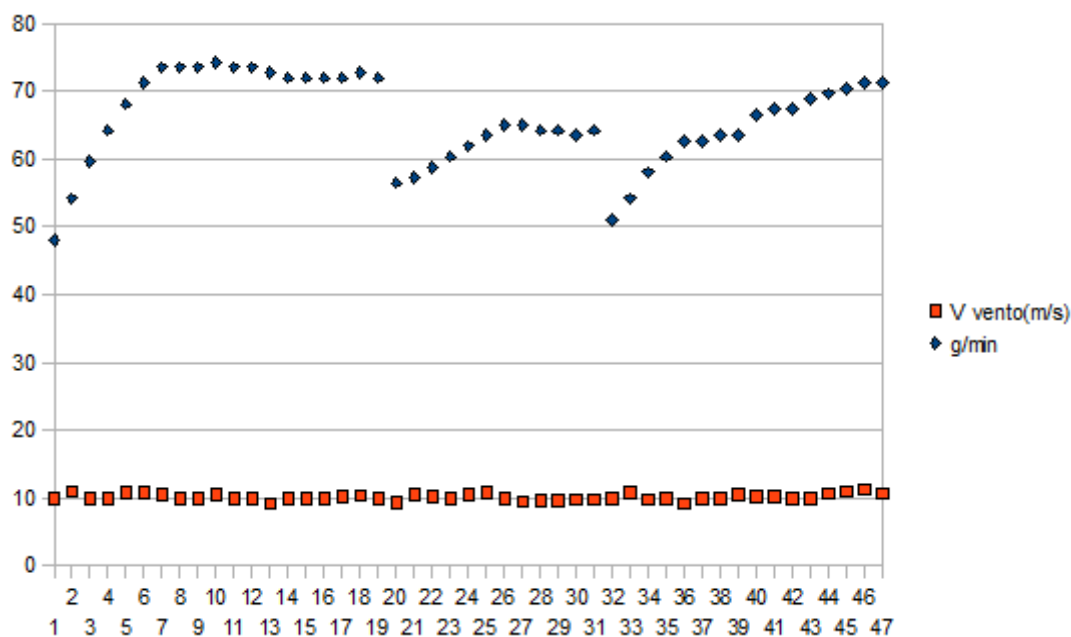
Tramite la prova descritta si vuole valutare la capacità del VentolOne di avviarsi e mantenere la velocità di rotazione raggiunta anche in presenza di diminuzioni notevoli dell'intensità ventosa simulate tramite l'inversione dell'auto una volta raggiunti i limiti della pista.

È stato possibile mantenere una velocità del vento costante, in quanto la prova non è stata disturbata da folate di vento.

Sono stati effettuati tre run.

Tramite lo svolgimento di queste prove è stato possibile valutare meglio il funzionamento del VentolOne, in quanto i dati di ventosità non si discostano molto tra loro.

I grafici ottenuti sono riportati di seguito.



110. Rappresentazione grafica CASO E.

Nel grafico in ascisse vengono rappresentate il numero di rilevazioni progressive, in ordinate i valori corrispondenti di v e velocità di rotazione.

I picchi negativi corrispondono alle inversioni effettuate dall'automobile.

Si è potuto notare subito una progressione costante nell'avvio della macchina eolica fino a raggiungere la sua velocità di rotazione limite di 74,5 giri al minuto.

Una volta raggiunta la velocità di rotazione limite questa viene mantenuta costante per tutta la percorrenza del run, fino a ridursi notevolmente durante l'inversione di pista. Il valore raggiunto durante la prima inversione è di 56 giri al minuto. Mantenendo costante la velocità del vento si è notata una discreta difficoltà del VentolOne a riportarsi sui valori di rotazioni evidenziati durante il primo run. La seconda inversione ha visto decrescere ancora la velocità di rotazione a 51 giri al minuto. A differenza del secondo run durante il terzo la velocità di rotazione ha avuto una crescita decisamente migliore.

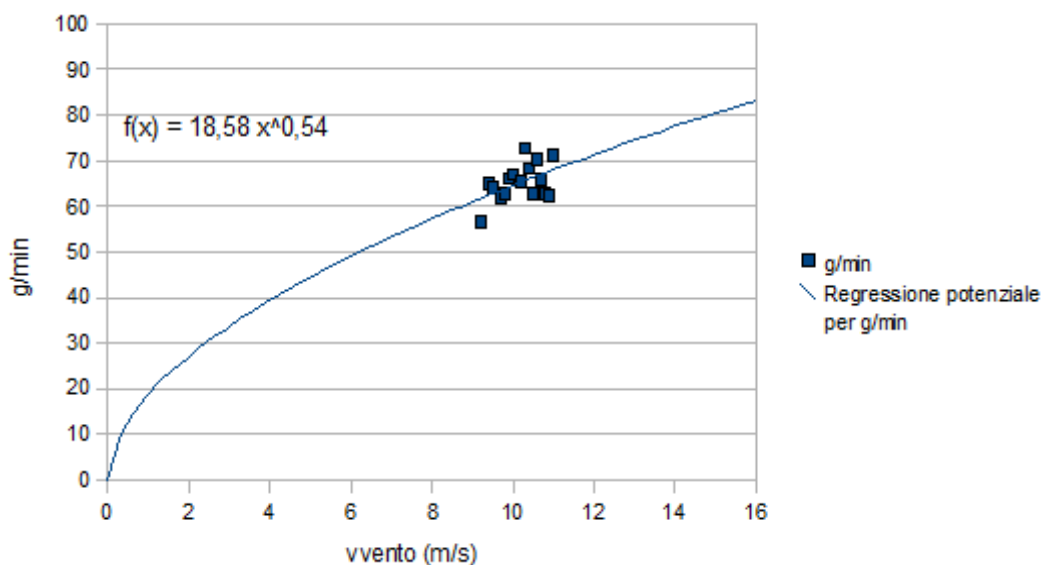
Da ciò si desume che al di sotto di un certo limite compreso tra 55 e 52 giri al minuto la macchina sia più rapida nell'avviarsi.

Questo rappresenta un limite intrinseco alla macchina assolutamente non previsto durante la fase di sviluppo della stessa. Difatti la velocità durante il secondo run è aumentata solo del 13,7% confrontato con un aumento del 39,4 % durante il terzo ed ultimo run.

La spiegazione risiede nel fatto che a velocità di rotazione comprese tra 55 e 61 giri al minuto il VentolOne stabilizza il suo funzionamento. Per uscire da questa banda morta richiede una coppia ulteriore che viene fornita solo in casi di aumento di velocità del vento oppure tramite un apporto esterno (motore elettrico, avviamento manuale, etc...).

Lavorando sotto i 52 giri al minuto il VentolOne possiede sufficiente inerzia per poter passare senza problemi la zona critica individuata potendo superare la soglia dei 70 giri al minuto senza problemi.

Dal grafico precedente non si è potuto ricavare una regressione sufficientemente precisa.



III. Sintesi CASO E.

Si è creato così un successivo grafico andando a definire i giri al minuto in funzione della velocità del vento. Sono stati inseriti i valori di velocità di rotazione appartenenti alle classi di velocità del vento, con un incremento di 0,1 m/s.

I valori sono esplicitati nella tabella successiva.

Si è così reso possibile avere un'idea più chiara del comportamento del VentolOne alle varie velocità, per poi poterlo confrontare in seguito con i valori ricavati dalle altre prove effettuate.

L'equazione ricavata è la seguente:

$$51 \quad g/min(v) = 18,58 x^{0,54}$$

Il valore medio della velocità di rotazione è 65,4 giri al minuto, corrispondente ad una velocità periferica u_{apice} pari a 3,42 m/s.

v vento (m/s)	u _{apice} (m/s)	λ	velocità di rotazione	
			rad/sec	g/min
9,20	3,54	0,39	7,08	67,68
9,40	2,96	0,31	5,91	56,47
9,50	3,40	0,36	6,80	64,98
9,70	3,36	0,35	6,72	64,20
9,80	3,24	0,33	6,48	61,88
9,90	3,28	0,33	6,56	62,65
10,00	3,46	0,35	6,92	66,09
10,20	3,50	0,34	7,00	66,91
10,30	3,42	0,33	6,84	65,36
10,40	3,81	0,37	7,61	72,71
10,50	3,58	0,34	7,15	68,33
10,60	3,28	0,31	6,56	62,65
10,70	3,68	0,34	7,37	70,39
10,80	3,44	0,32	6,88	65,75
10,90	3,28	0,30	6,56	62,65
11,00	3,26	0,30	6,52	62,27
11,20	3,72	0,33	7,45	71,16

La tabella riassuntiva esplicita i valori medi ottenuti durante le rilevazioni per ciascuna classe di velocità.

La velocità periferica u_{apice} è molto bassa, di conseguenza il VentolOne non riesce a trasformare l'energia della corrente ventosa in energia meccanica in maniera sufficiente a garantire un corretto funzionamento della macchina stessa.

E' quindi molto utile valutare il grafico corrispondente all'andamento di λ in funzione della velocità del vento.

I valori di λ si attestano intorno a 0,33, con un massimo di 0,39 in corrispondenza di una velocità del vento pari a 9,2 m/s.

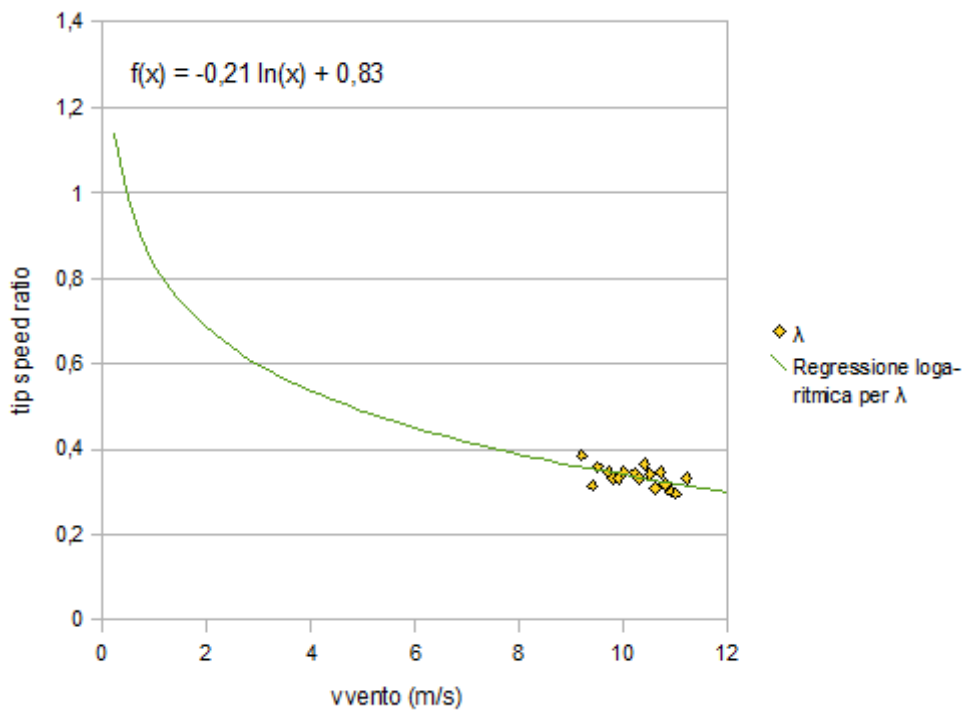
Teoricamente è possibile raggiungere valori di λ elevati solo in presenza di venti deboli, intorno al I grado della scala Beufort. Effettivamente è ciò che avviene nella realtà dove per bassi valori di ventosità si hanno i valori di tip speed ratio più alti, intorno a 1, mentre decrescono notevolmente all'aumentare della velocità del vento.

L'equazione caratteristica di λ durante questa prova è la seguente:

$$^{52} \quad \lambda(v) = -0,21 \ln(x) + 0,83$$

Il decremento notevole di λ all'aumentare della velocità del vento è dovuto a fenomeni di carattere aerodinamico; difatti il profilo tende a “chiudersi” cioè a ruotare su se stesso trovando una posizione che ne consente la condizione di equilibrio aerodinamico.

L'argomento verrà ampiamente trattato nel successivo paragrafo “Commenti”.



112. Andamento di $\lambda(v)$ CASO E.

CASO F

v	10 m/s
β	5°
Φ	1 m
alternatore	scollegato

Tramite questa prova si vuole effettuare una comparazione tra angoli di attacco differenti.

Inoltre si vuole valutare la capacità del VentolOne di auto-avviarsi e mantenere la velocità di rotazione raggiunta. Improvvisi cali dell'intensità ventosa saranno simulati tramite l'inversione dell'auto una volta raggiunti i limiti della pista.

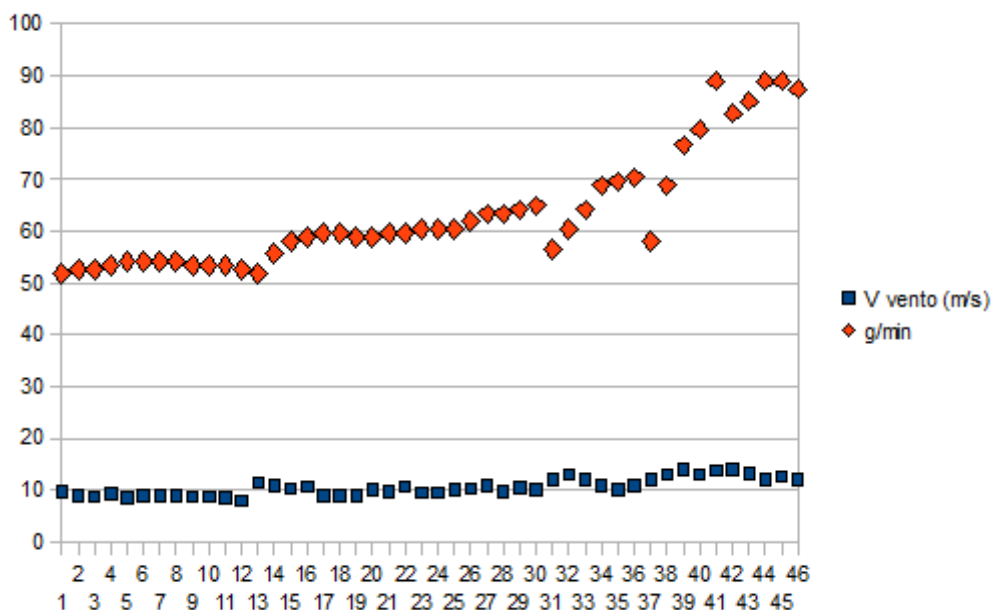
Sono stati effettuati i 4 run previsti più un run aggiuntivo per valutare il limite della struttura.

Da una prima analisi si è potuto appurare una certa difficoltà in fase di avviamento. Durante il primo run il VentolOne non ha superato la velocità di rotazione di 55 giri al minuto, ricadendo nella banda morta descritta nella prova precedente.

Durante l'inversione dell'auto a fondo pista la velocità di rotazione della turbina eolica è diminuita sotto i 52 giri al minuto. Ciò ha dato modo alla macchina di uscire dalla zona morta e riprendere il suo funzionamento ottimale superando i 65 giri al minuto alla fine del secondo run. La velocità di rotazione è in costante crescita, ciò significa che sarebbero stati sufficienti altri 45 secondi (il tempo di percorrenza di un run) per accrescere la propria velocità fino ad

arrivare a 75 giri al minuto. Ovviamente questo valore è frutto di una stima.

Nei successivi due run la velocità del vento è stata aumentata al fine di valutare il comportamento strutturale della macchina ed analizzarne le prestazioni.



113. Rappresentazione grafica CASO F.

Graficamente si può osservare un notevole incremento della velocità di rotazione durante il quarto run, arrivando fino al valore limite di 89 giri al minuto a 12,3 m/s.

La macchina è quindi molto reattiva per venti superiori agli 11 m/s raggiungendo molto velocemente il limite di funzionamento e mantenendolo.

Il limite raggiunto non soddisfa comunque le aspettative.

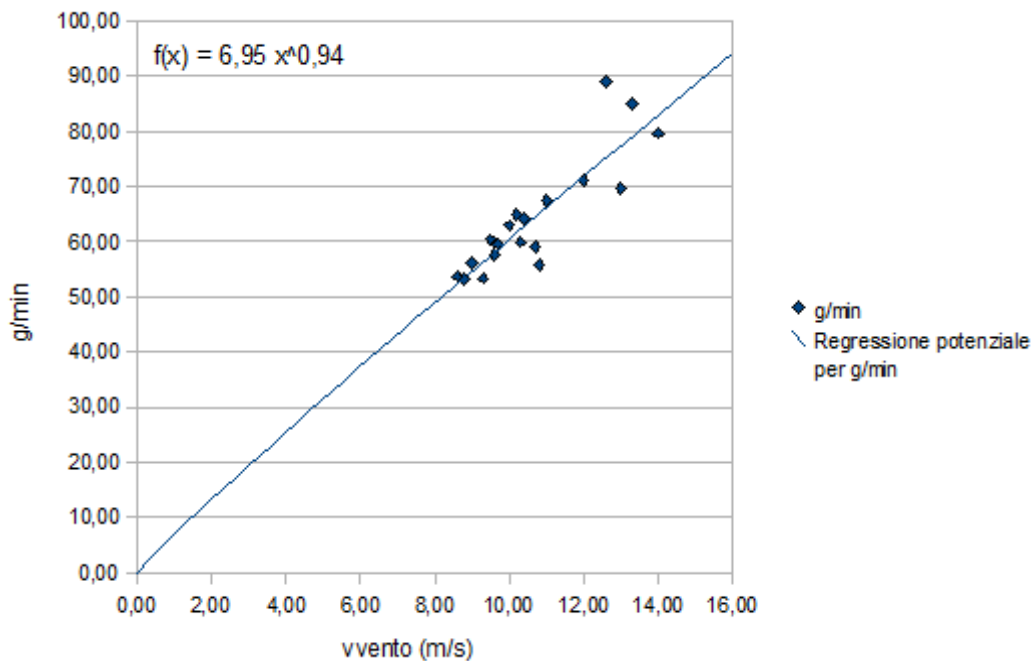
Andando a classificare i valori di rotazione in funzione della velocità del vento misurata, e creando una regressione potenziale che semplifichi il funzionamento con questa configurazione, si ottiene una curva assimilabile ad una retta.

Teoricamente quindi, in questa configurazione, il VentolOne assume un comportamento lineare.

Ciò si desume anche dal ridotto range di variazione di λ che, sempre teoricamente, non supera il valore di 0,4 nemmeno in avvio, in pieno contrasto con i dati ottenuti fino ad ora.

La curva di variazione teorica del numero di giri ha equazione:

$$g/min(v) = 6,95 v^{0,94}$$



114. Sintesi CASO F.

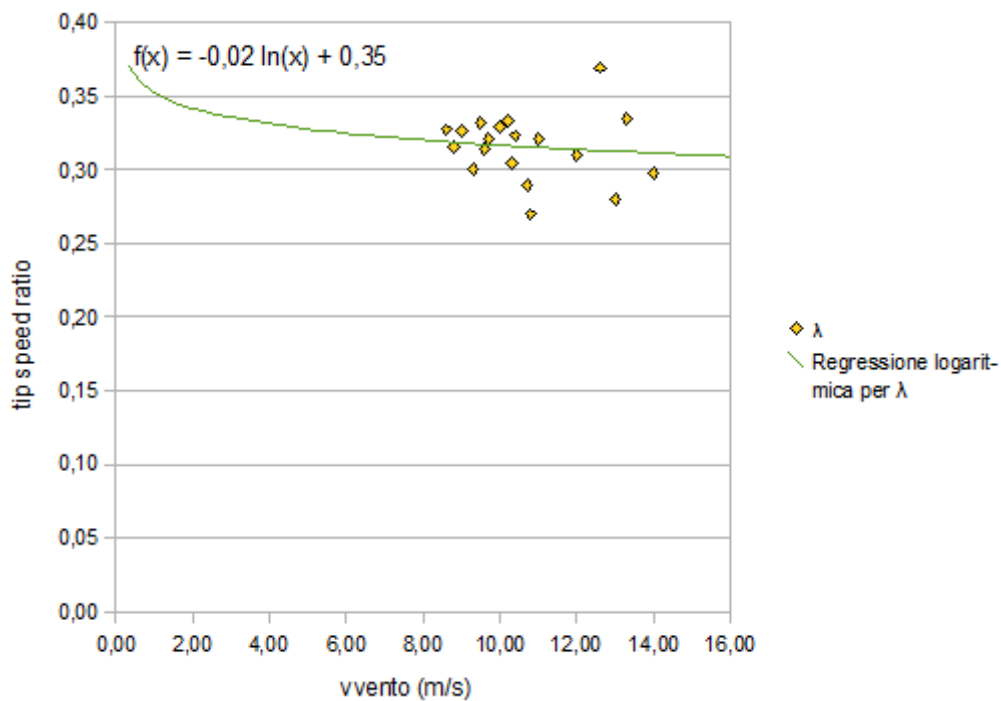
Un incremento pressoché lineare è stato verificato dopo le decelerazioni della velocità del vento. Ciò è da spiegarsi tramite la capacità del VentolOne di raggiungere la sua condizione limite di esercizio in tempi molto brevi. Dal grafico riassuntivo si nota anche come una volta uscito dalla banda morta il VentolOne accresca progressivamente la sua velocità. I picchi negativi sono da considerarsi eccezioni dovute all'inversione di marcia dell'automobile una volta raggiunta la fine della pista.

Il valore medio della velocità di rotazione si attesta in 64,35 giri al minuto attestando il valore di λ a 0,34 a 10 m/s.

Anche la *tip speed ratio* indica una discreta stabilità di funzionamento alle varie velocità. La regressione logaritmica creata indica un valore massimo di λ all'avvio di 0,37, in controtendenza con i valori prossimi o superiori all'unità evidenziati fino ad ora dalle precedenti stime tramite regressioni logaritmiche analoghe.

La rappresentazione grafica ricavata dalla media dei valori ottenuti alle varie classi di velocità misurate presenta un picco negativo a 0,27 ed un massimo a 0,37.

il valore medio si attesta in 0,32.



115. Andamento di $\lambda(v)$ CASO F.

La regressione logaritmica ha equazione:

$$\lambda(v) = -0,02 \ln(x) + 0,35$$

I grafici sono stati ricavati dalla seguente tabella:

v vento (m/s)	u apice (m/s)	λ	velocità di rotazione	
			rad/sec	g/min
8,60	2,81	0,33	5,63	53,76
8,80	2,78	0,32	5,56	53,11
9,00	2,94	0,33	5,88	56,14
9,30	2,79	0,30	5,59	53,37
9,50	3,16	0,33	6,31	60,33
9,60	3,02	0,31	6,03	57,63
9,70	3,12	0,32	6,23	59,56
10,00	3,29	0,33	6,58	62,91
10,20	3,40	0,33	6,80	64,98
10,30	3,14	0,30	6,27	59,95
10,40	3,36	0,32	6,72	64,20
10,70	3,10	0,29	6,19	59,17
10,80	2,91	0,27	5,83	55,69
11,00	3,54	0,32	7,07	67,55
12,00	3,72	0,31	7,43	71,01
12,60	4,66	0,37	9,31	88,95
13,00	3,64	0,28	7,29	69,62
13,30	4,45	0,33	8,91	85,09
14,00	4,17	0,30	8,34	79,67

La tabella riassuntiva esplicita i valori medi ottenuti durante le rilevazioni per ciascuna classe di velocità.



116. Svolgimento delle prove dinamiche.

11.3.4.5 *Commenti.*

Per comprendere meglio i risultati ottenuti bisogna prima di tutto evitare di considerarli attendibili al cento per cento. Con questo si vuole dire che i metodi e gli strumenti usati per le misurazioni non sono paragonabili alla strumentazione ad alla metodologia di lavoro rigorosa adottata in galleria del vento.

Queste prove ed i commenti a seguire servono per dare indicazioni sullo sviluppo del VentolOne, senza avere la pretesa di essere esenti da errori.

Un primo inconveniente verificatosi è il distacco di una pala durante le prime prove a velocità 8 m/s, causato da un difettoso serraggio del collegamento tra i bracci A ed i bracci B.



117. Collegamento tra i bracci A ed i bracci B.

Il problema è stato risolto cambiando la vite di fissaggio difettosa. È stato effettuato un controllo di tutte le rimanenti pale e non è stato evidenziato alcun problema.

Una volta applicato il correttivo non si è verificato più alcun distacco.

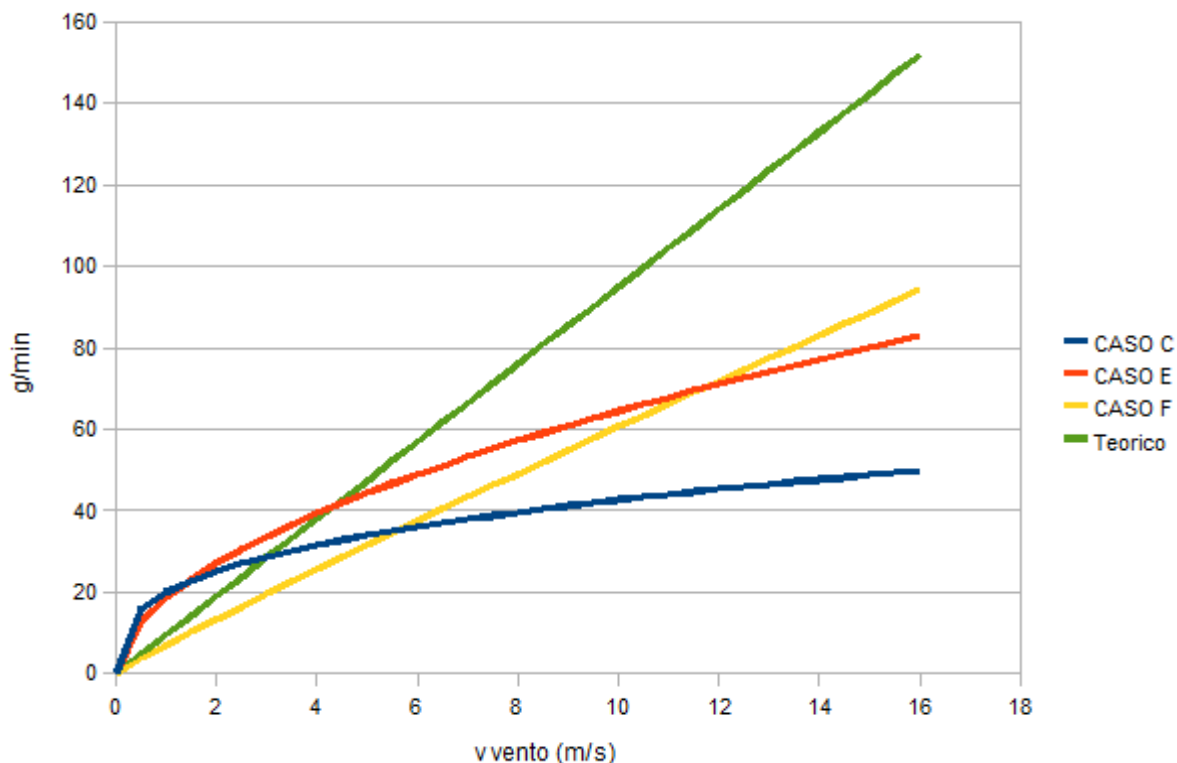
La struttura non ha manifestato segni di cedimento nonostante le vibrazioni presenti durante tutto lo svolgimento dei test, vibrazioni causate da una leggera curvatura del tubo formate il corpo centrale.

Data la provenienza del tubo, che si ricorda essere materiale di scarto di una precedente ristrutturazione edilizia, è accettabile che siano presenti imperfezioni. Nelle realizzazioni successive verrà comunque tenuto in considerazione questo aspetto, introducendo un controllo più restrittivo del materiale usato.

Si ricorda che le vibrazioni indotte possono avere effetti molto gravi diminuendo notevolmente la vita media delle componenti della macchina eolica; inoltre le componenti

hanno alle spalle già un utilizzo più o meno prolungato e ciò diminuisce ancora il campo di utilizzo, andando ad aumentare le probabilità di rottura sotto stress.

Le indicazioni ottenute partono da un'analisi sulla *velocità di rotazione* del VentolOne ottenuta durante le prove.



118. Confronto tra velocità di rotazione in funzione del vento.

Appare subito chiaro il notevole gap tra tutti e tre i casi analizzati e la situazione teorica, ottenuta mediante l'ausilio dell'equazione:

$$48 \text{ rpm} = 19 v \frac{\lambda}{2r}$$

Le perdite di velocità sono mediamente stimabili nel:

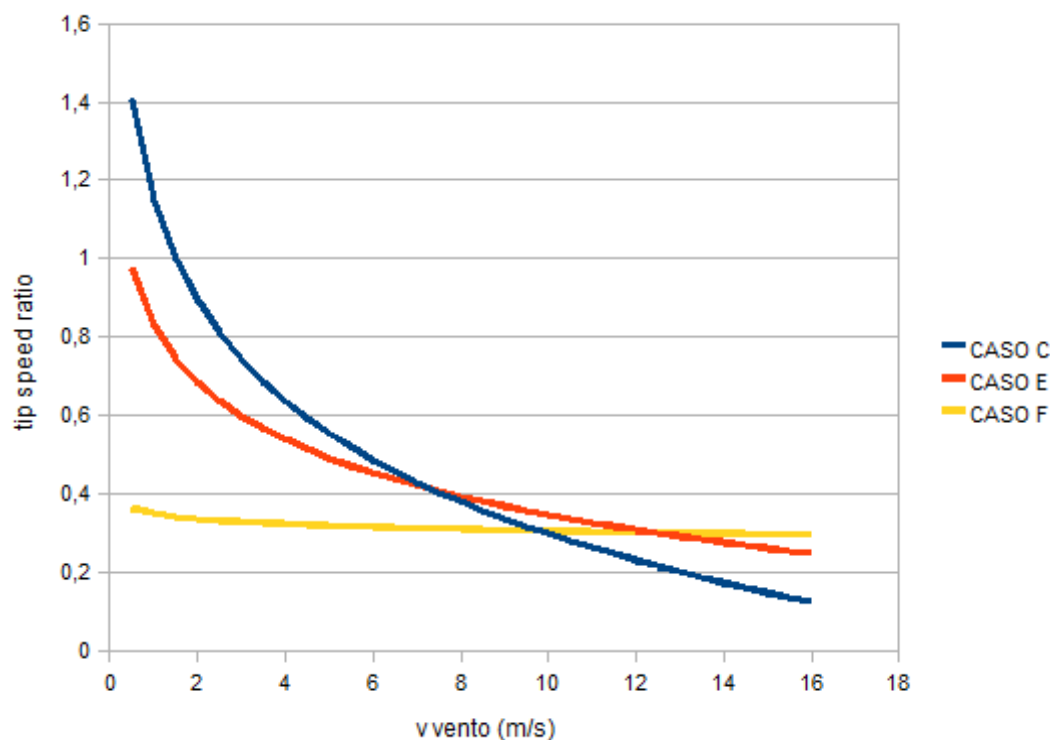
66,7 % CASO C

46,0 % CASO E

38,7 % CASO F

Come si evince dall'equazione 48) la variabile principale è λ .

Dal grafico successivo si nota come λ diminuisca notevolmente all'aumentare della velocità causando quindi un decremento notevole del valore di C_p , che si attesta intorno a 0,12. Tutto ciò è causa di una bassissima conversione dell'energia del vento in potenza all'albero.



119. Confronto tra λ .

A 10 m/s la potenza P estratta è di 61,25 W, il 66,5 % in meno rispetto alla potenza teorica ottenibile.

Il crollo del valore di λ è dato da motivi prettamente aerodinamici.

Le pale una volta superata la velocità di 6 m/s tendono a chiudersi verso l'interno. Il bordo d'attacco quindi non assume più i valori stabiliti ma punta verso il centro del VentolOne andando a definire un angolo di attacco β negativo; di conseguenza il profilo lavora a deportanza anziché a portanza riducendo notevolmente la sua potenzialità.

Il comportamento sopra descritto è influenzato da un fattore di cui non si è tenuto conto in fase di progettazione: il momento aerodinamico.

Esso infatti è caratteristico di ogni profilo alare. Il passaggio dell'aria genera un *momento aerodinamico* che, appunto, tende a muovere il profilo. Il punto d'azione è all'incirca al 25% della corda media.

Avendo posizionato il dado di regolazione H prima del 25% della corda, il momento aerodinamico trova un braccio per agire ruotando così il profilo.

La prima correzione consiste quindi nello spostare la vite di regolazione dell'angolo di attacco al 25% della corda; in questo modo si annulla il valore del braccio e la forza aerodinamica prodotta dal profilo non può generare un momento.

La chiusura delle pale è anche causata dalle vibrazioni a cui è soggetto il VentolOne durante la

sua rotazione. Al termine di ogni prova è stato riscontrato l'allentamento del dado di serraggio, allentamento causato dalle vibrazioni.

Le vibrazioni presenti a lungo andare possono a rovinare i cuscinetti oltre che causare guasti strutturali di maggiore entità.

Il problema è causato da una impercettibile curvatura del corpo centrale. Inoltre la chiusura delle pale aumenta i fenomeni vibrazionali.

Nel successivo prototipo verrà introdotto un controllo rigoroso della perfetta linearità del corpo centrale.

Un ulteriore inconveniente riscontrato risiede nella configurazione aerodinamica delle pale.

Andando a verificare il valore dell'*allungamento alare* λ_a ci si è resi conto del suo valore assolutamente non in linea con le caratteristiche di funzionamento a cui l'ala è chiamata a lavorare.

Il valore di λ_a del VentolOne è 3,33.

Grandi allungamenti diminuiscono la resistenza indotta dal profilo e si usano nel campo delle costruzioni aeronautiche per velivoli lenti e leggeri, mentre limitati allungamenti alari generano un'alta resistenza indotta e vengono usati per velivoli veloci e pesanti.

Siccome le caratteristiche di funzionamento del VentolOne sono di lavorare con venti deboli (anche velocità di 20 m/s vengono considerate in aeronautica velocità ridotte) ed il peso delle ali è molto basso, il valore dell'allungamento alare non è ottimale.

Difatti dovrebbe essere sicuramente maggiore di 14 per poter assicurare le caratteristiche aerodinamiche ottimali alle pale. Il λ_a attualmente in uso è caratteristico di ali per velivoli supersonici.

Ricordando la 32):

$$32 \quad \lambda_a = \frac{l}{c}$$

è possibile variare il valore dell'allungamento alare e portarlo nei giusti range diminuendo la corda alare ed aumentando contemporaneamente la lunghezza della pala.

Una verifica aggiuntiva ha riguardato lo *spessore* s del profilo alare. È possibile, infatti, che lo spessore non fosse sufficiente per facilitare l'avviamento della macchina eolica. Numerose fonti consultate riferiscono che uno spessore relativo (sempre in percentuale rispetto alla corda) compreso tra il 10% ed 15% siano i più adatti a lavorare in condizioni di velocità del vento (o del profilo) subsoniche. Lo spessore relativo si calcola nel seguente modo:

$$55 \quad s_r = \frac{s}{c} \cdot 100$$

Attualmente il profilo usato, MVA – 227 ha uno spessore relativo del 14,60 % al 25% della corda.

Lo spessore del profilo rientra nel caso sopraindicato ma per velocità del vento molto basse nell'ordine della decina di metri al secondo ci si pone l'interrogativo se occorrerebbe uno spessore relativo maggiore.

Di contro questa soluzione aumenta la resistenza del profilo.

È stata evidenziata inoltre una *fascia morta* nel funzionamento della macchina eolica compreso tra 55 e 61 giri al minuto. In questa fascia la velocità di rotazione si stabilizza non riuscendo ad aumentare in condizioni di vento costante.

Diminuendo la velocità di rotazione e scendendo al di sotto dei 53÷54 giri al minuto il VentolOne esce da questa zona. A successivi aumenti della velocità di rotazione possiede sufficiente inerzia per superare agevolmente la fascia morta.

In alternativa occorre disporre di una coppia che faccia uscire la macchina da questo range.

La coppia può essere fornita mediante motore elettrico oppure da un brusco aumento della velocità del vento.

La prima ipotesi è da scartare poiché non avrebbe alcun senso nell'ottica di una aerogeneratore per PVS. Accrescerebbe il livello tecnologico introducendo un componente (il motore elettrico) non facilmente reperibile oppure reperibile a costi elevati. Questa soluzione richiederebbe anche un controllo elettronico oltre che la presenza di una rete elettrica o di una batteria.

La velocità di rotazione non è comunque regolabile poiché in funzione della velocità del vento.

La zona morta è una seconda conseguenza della modificazione dell'angolo di attacco.

Difatti in condizioni di funzionamento ottimali la turbina eolica avrebbe avuto le potenzialità per uscire dalla zona morta.

Ulteriore problema presentatosi è la mancanza di rotazione una volta collegato l'*alternatore*.

L'alternatore di recupero è un Magneti Marelli AA125R 14V 45A proveniente da una Fiat Panda.

Il collegamento non aveva finalità di misurazione ma di simulazione della struttura oltre che individuare una prima ipotesi di trasmissione di moto, ovviamente nella piena consapevolezza che un rapporto 15:1 era presumibilmente inattuabile.

Le prove hanno evidenziato un'estrema difficoltà di avviamento che avveniva ma portava comunque a velocità di rotazione del VentolOne dell'ordine di 20 giri/min, 300 giri/min sull'alternatore, con vento di 10m/s.

A 115 giri/min (picco max a vuoto) significa che veniva sviluppata una coppia teorica all'albero pari a 12,5 Nm in parte dissipata dalla turbolenza.

Con il rapporto 15:1 all'alternatore arriverebbero 1725 giri al minuto, appena sufficienti ad avviarlo, ma a quella velocità angolare il suddetto richiede circa 4 Nm di coppia, equivalenti all'albero del VentolOne a 60 Nm.

Di fatto, con questo VentolOne così costruito è impossibile accoppiare questo alternatore, anche variando il rapporto di trasmissione: introducendo infatti un rapporto minimo di 11:1, si avrebbero 1200 giri/min all'albero dell'alternatore e 1,13 Nm, a fronte di una richiesta di 2,39 Nm.

La soluzione alla mancanza di coppia è aumentare il diametro del VentolOne. In questo modo il braccio sarebbe maggiore ed anche a parità di forza prodotta dalle ali la coppia disponibile all'albero aumenterebbe.

La forza F prodotta dal VentolOne durante il suo funzionamento è di 25 N e teoricamente ampliando il diametro fino al massimo consentito di 2 m la coppia Q risultante raddoppierebbe diventando 25 Nm, comunque insufficiente per far muovere l'alternatore Marelli collegato.

Di conseguenza un alternatore di derivazione automobilistica non rappresenta la scelta migliore con questa configurazione.

L'avviamento del VentolOne ed il raggiungimento della sua velocità di funzionamento presenta un tempo molto lungo, tuttavia non presenta un dato negativo in quanto i rotori Darrieus ed H-Darrieus presentano tempi di avviamento molto lunghi dovuti alla mancanza di coppia di spunto, come già ricordato nel paragrafo "Rotore Darrieus" 9.2.2.2.

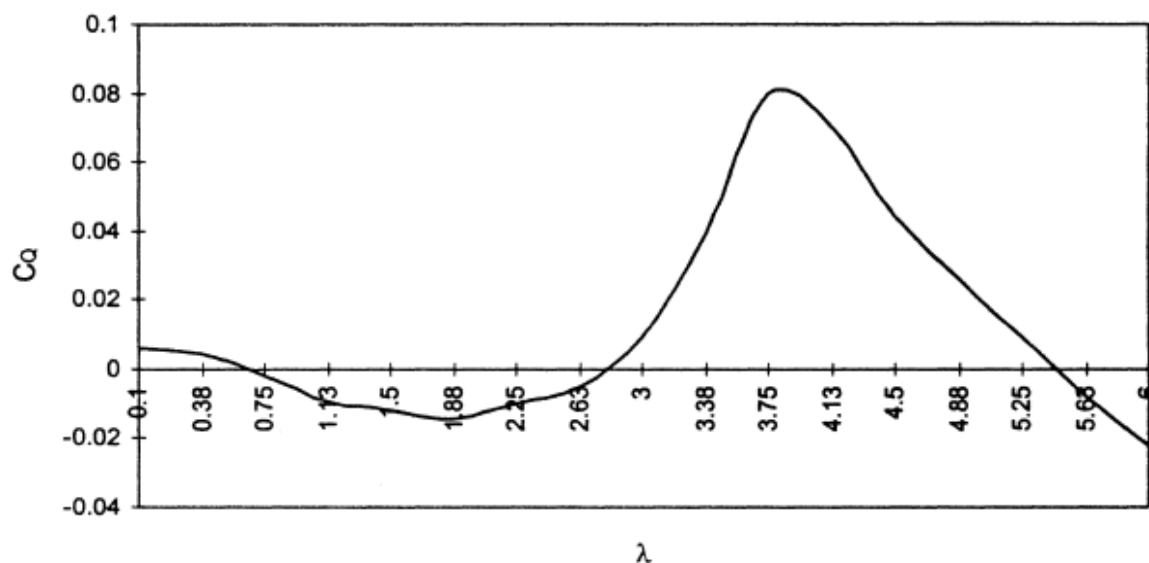
Una volta raggiunta la velocità di funzionamento il comportamento della turbina eolica si mantiene costante. Un altro aspetto positivo è la reattività della macchina nel riprendere le condizioni standard di funzionamento in presenza di vento variabile.

Per quanto riguarda i palesi problemi all'avvio possono essere prese in considerazione altre ipotesi oltre all'aumento del diametro.

La prima riguarda la *solidità* della macchina eolica, solidità definita come il rapporto tra l'area effettivamente spazzata dalle pale e la superficie frontale occupata dalle stesse pale.

Il VentolOne presenta un rapporto di solidità pari a 0,9 che non permette l'incremento di λ oltre ad 1. La tip speed ratio non riesce a raggiungere i valori ottimali stimati attorno a $3 \div 4$, di conseguenza la turbina non riesce ad esprimere tutto il suo potenziale, indipendentemente dai fenomeni di cambiamento di assetto aerodinamico dovuti alla chiusura verso il centro delle pale.

Una seconda motivazione risiede nella presenza di una “*dead band*” citata in Kirke (1998), dove l'autore afferma che esiste appunto una zona morta a λ inferiore ad 1.



120. Curva tipica $C_Q(\lambda)$.¹³

Dalla figura è possibile valutare come per VAWT esista una zona morta dove il coefficiente di coppia C_Q in funzione di λ è negativo. Questo spiegherebbe in parte il perché il VentolOne non abbia sufficiente coppia di spunto facendo estrema fatica ad avviarsi.

La coppia Q ottenibile ha equazione:

$$56 \quad Q = \frac{1}{2} \rho A v^2 r C_Q \eta_{TOT} [Nm]$$

Occorre quindi aumentare il λ di progetto riducendo la solidità della macchina eolica, ed agire anche sulla configurazione aerodinamica.

Kirke asserisce inoltre che il generale miglioramento di prestazioni, intese come capacità di auto-avviamento della turbina, si hanno nel caso si scelgano profili alari curvi.

Altre fonti ritengono che profili concavo convessi aumentino i fenomeni di turbolenza inficiando le prestazioni dell'ala e di conseguenza riducendo la capacità di estrarre energia dal vento, preferendo profili piano convessi e scartando profili simmetrici.

Al termine delle prove è quindi lecito porsi la domanda se il profilo alare scelto fosse quello corretto.

A tale proposito è stata compiuta un'analisi riguardante alcuni profili di diverse caratteristiche, con il fine di fugare dubbi sull'andamento di portanza L e coefficiente di sforzo tangenziale C_T .

¹³ Figura 120. Brian Kinloch Kirke. (1998) *Evaluation of self starting Vertical Axis Wind Turbine for stand alone application*.

Il coefficiente C_T non può essere assimilato al C_Q in quanto quest'ultimo è determinato a partire da una misura delle prestazioni. Il C_T inoltre è un coefficiente rappresentativo di una forza, non di una coppia.

Sperimentalmente ed in prima approssimazione è possibile ricavare il C_Q partendo da C_T :

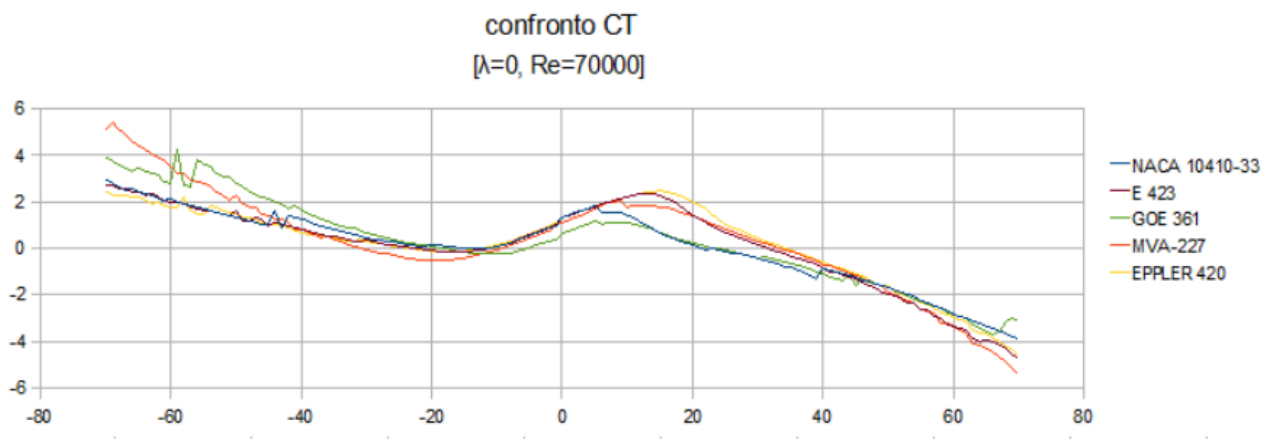
$$57 \quad C_Q = C_T \cdot r \cdot N_{pale}$$

Un ulteriore metodo di calcolo del C_Q è il seguente:

$$58 \quad C_Q = \frac{C_{pr}}{\lambda}$$

Si ribadisce come l'equazione precedente sia valida solo a titolo comparativo, mettendo in relazione C_T a C_Q .

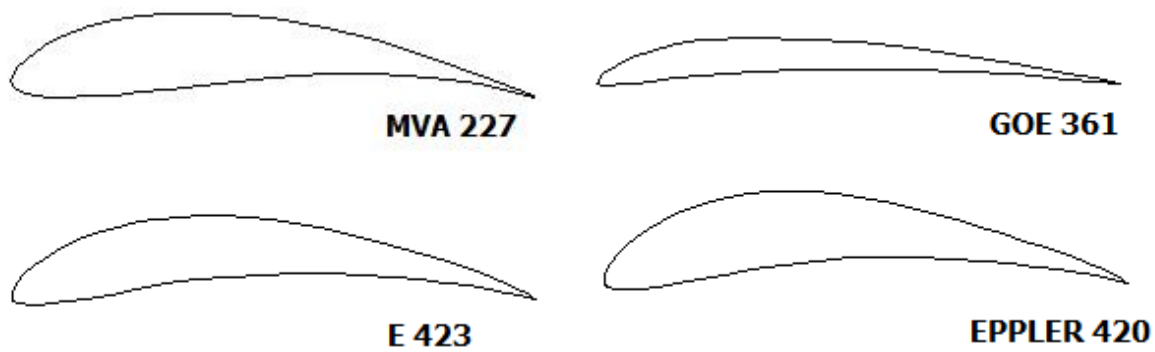
Per questo motivo il confronto è stato effettuato tra i vari coefficiente di sforzo tangenziale ad angoli di attacco compresi tra -70° e $+70^\circ$, al fine di valutare l'andamento lungo gran parte della circonferenza descritta dal movimento delle pale.



121. Confronto C_T .

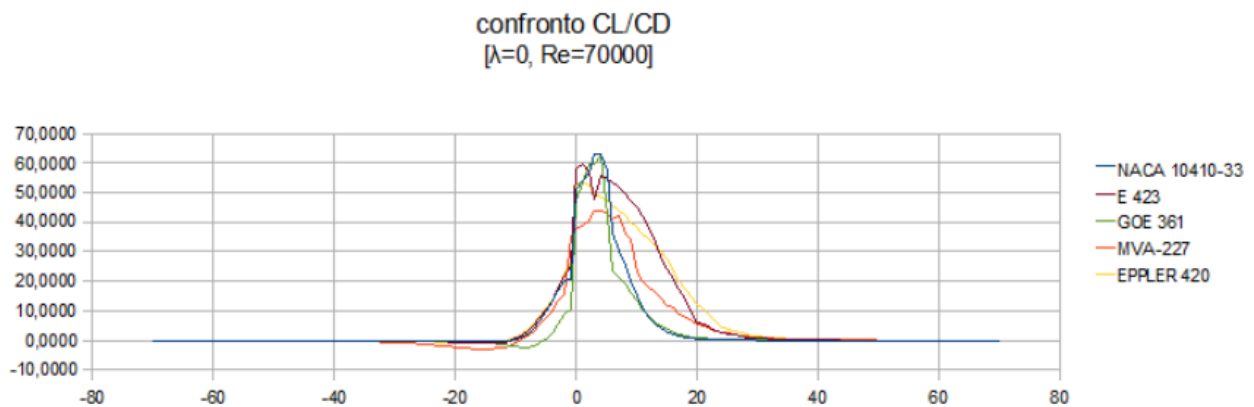
Il valore di λ è stato considerato nullo poiché si vuole valutare la capacità di auto-avviamento della turbina.

In particolare è possibile notare come per profili laminari, cioè profili con spessore relativo molto piccolo, il C_T sia molto più piccolo rispetto a profili non laminari come Eppler 420 o MVA – 227 usato per il VentolOne. Il profilo laminare è GOE 361.



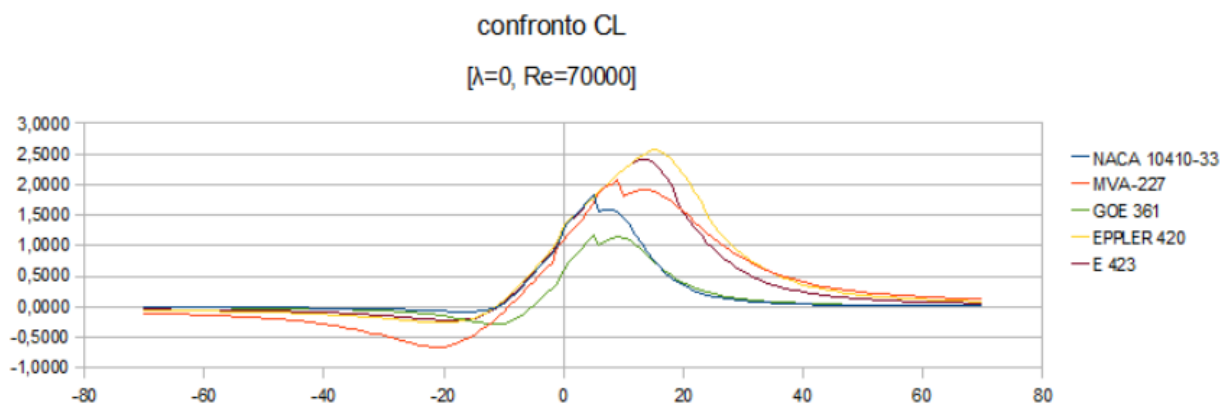
122. Confronto visivo tra profili.

È inoltre possibile confrontare i profili in termini di efficienza in funzione dell'angolo di attacco.



123. Confronto $E (C_L/C_D)$.

Un'ulteriore osservazione può essere condotta sul coefficiente di portanza.



124. Confronto C_L .

L'analisi dei grafici precedenti sottolinea come i profili laminari non siano in linea con le condizioni di funzionamento richieste.

Nonostante il GOE 361 sia dotato di una buona efficienza, questa si manifesta con brusche variazioni, sintomo di un aumento improvviso del coefficiente di resistenza C_D , visto che l'andamento del coefficiente di portanza non presenta picchi.

Valutando il C_L si nota come esso sia di gran lunga minore rispetto a tutti gli altri esempi riprodotti, conseguenza del fatto che questo tipo di profilo è pensato per lavorare a velocità alte, sicuramente di un'ordine di grandezza maggiore rispetto alla velocità del vento alla quale lavora il VentolOne.

Profili spessi come l'Eppler 420 dimostrano C_T elevati in confronto con i laminari, di conseguenza offrono sicuramente un maggiore e migliore C_Q lungo tutta la circonferenza descritta dalla rotazione delle pale. La costanza presentata nel C_T si dimostra tale anche nel grafico rappresentante l'efficienza, offrendo inoltre un coefficiente di portanza decisamente più alto a confronto con profili laminari.

La costanza delle variazioni dei vari coefficienti è un fattore molto importante poiché a brusche variazioni dei coefficienti sono assimilabili brusche variazioni delle forze associate ai coefficienti. Brusche variazioni provocano vibrazioni e stress strutturali che dalla pala si ripercuotono al resto della struttura, potendo provocare rotture o perdite di efficienza notevoli. Basandosi su questo criterio verranno definite selezioni più accurate del profilo nelle versioni successive del VentolOne.

Dai grafici precedenti è possibile valutare il comportamento del profilo usato, MVA – 227.

Il comportamento dei tre parametri presi in considerazione non è costante, infatti presenta brusche variazioni intorno a $\beta = 10^\circ$. Tale discontinuità è una caratteristica propria del profilo alare e non dipende in alcun modo da nessun altro parametro.

Presenta inoltre una zona nella fase di lavoro del profilo a β negativo, seppur ridotta, dove il coefficiente di sforzo tangenziale è negativo. Si presenta la stessa caratteristica per quanto riguarda l'analisi del CL dove raggiunge il picco negativo a -20° . Questa fase è critica poiché l'ala è in quel tratto, che corrisponde ad un angolo azimutale $320^\circ \leq \theta \leq 350^\circ$, dove andrà a scaricare la potenza estratta dal vento sull'albero di rotazione.

Il comportamento manifestato non è quindi ottimale in quanto richiederebbe meno escursioni in campo negativo.

Non è ancora possibile determinare quanto questa caratteristica influenzi la velocità di rotazione del VentolOne e le sue prestazioni in generale, poiché parametri più importanti definiti in precedenza sono risultati non conformi, prima di tutti la chiusura delle pale che ha inficiato in maniera massiccia lo svolgimento regolare delle prove.

11.4 CONCLUSIONI TRATTE DALLE PROVE.

Le prove tecniche effettuate hanno avuto il compito di fornire delle indicazioni riguardo il funzionamento e le prestazioni della turbina.

Sono state eseguite mediante l'ausilio di un'automobile poiché il test in galleria del vento avrebbe richiesto un budget estremamente elevato, oltre che competenze tecniche specifiche che esulano dalla trattazione di questa Tesi. Non si esclude, anzi si auspica, che in un futuro il VentolOne possa essere testate in galleria del vento.

Vista la strumentazione utilizzata, le indicazioni fornite dalle prove devono essere valutate soprattutto dal punto di vista qualitativo e si sono rivelate utili a capire il funzionamento del VentolOne, evidenziandone i principali limiti, permettendo così successivi sviluppi e correzioni.

Bassi valori di tip speed ratio.

L'analisi delle prove tecniche effettuate ha dunque evidenziato una perdita di velocità di rotazione ottenuta rispetto a quella teorica ottenibile. Le perdite di velocità influenzano notevolmente la *tip speed ratio* riducendo anch'essa al di sotto dei valori stimati.

Una λ bassa non permette la corretta estrazione di energia dal vento riducendo il C_{pr} da 0,35 ottenibile a λ pari a 6, a C_{pr} 0,1 a λ pari a 1.

Agli attuali valori di *tip speed ratio* risulta impossibile azionare un carico che sia esso un alternatore o un'apparecchiatura meccanica.

La principale causa di questo inconveniente è da attribuirsi alla variazione di incidenza delle pale durante il funzionamento.

Variazione di incidenza delle pale.

Le prove tecniche hanno potuto evidenziare, come già ricordato in precedenza, la tendenza delle pale di variare la loro inclinazione verso angoli di attacco negativi. La principale causa è da attribuirsi all'allentamento del dado di serraggio delle pale con i bracci. Inoltre il dado di serraggio non è in posizione ottimale in quanto posto prima del 25% della corda alare. In questa posizione permette al momento aerodinamico di agire sulle pale variandone l'incidenza.

Ulteriore causa di questa problematica è la presenza di vibrazioni sulla struttura che scaricano parzialmente la loro energia sui dadi di serraggio allentandoli.

Vibrazioni.

Le vibrazioni riscontrate durante l'esecuzione delle prove ha indubbiamente ridotto l'efficienza complessiva della turbina, avendo due effetti distinti.

Il primo riguarda la dissipazione di energia estratta dal vento; le vibrazioni fanno in modo che non tutta l'energia disponibile venga trasferita all'albero di rotazione, e di conseguenza all'alternatore o all'eventuale apparecchiatura meccanica collegata all'albero.

Il secondo effetto si manifesta sui dadi di serraggio delle pale ai bracci, allentandoli. Questo effetto, in combinazione con l'azione del momento aerodinamico, permette alle pale di variare la propria incidenza toccando valori di β negativi. Gli effetti di questa variazione provocano una diminuzione delle rivoluzioni al minuto e conseguentemente una diminuzione di λ e C_{pr} .

Bassa coppia di spunto.

La bassa coppia di spunto è un fattore caratterizzante di questa tipologia di turbine. Nel VentolOne è stata evidenziata una zona morta compresa tra 55 e 61 giri al minuto del tutto analoga a quella descritta da Kirke (1998). La bassa coppia di spunto non ha permesso l'auto-avviamento del VentolOne in tempi brevi nell'ordine del minuto, anche se è stato osservato che una volta avviato ed uscito dalla fascia morta l'aerogeneratore mantiene costante il suo movimento rotatorio.

Il problema è amplificato dall'alto rapporto di solidità che non permette un buono spunto alla partenza.

Spessore del profilo.

Il valore di spessore del profilo relativo alla corda alare si è dimostrato insufficiente non permettendo un buono spunto in avvio nonostante il C_D ridotto.

Basso allungamento alare.

È stato concluso che, come indicato in letteratura, un basso allungamento alare non favorisce le prestazioni a velocità ridotte. I parametri che influenzano λ_a sono le misure di corda alare e lunghezza della pala; tali misure si sono dimostrate inappropriate per questo genere di turbina e per gli utilizzi previsti.

Difetti nei materiali.

Alcuni dei materiali non si sono mostrati adatti allo scopo per cui sono stati utilizzati. Questo ha causato il fenomeno delle vibrazioni (vedi sopra). Le prove hanno quindi fornito

indicazioni valide sulle caratteristiche che deve avere un materiale, soprattutto di recupero, per essere utilizzato nella costruzione di una turbina eolica.

Manca di rotazione una volta collegato un carico.

Una volta collegato l'alternatore si è verificato l'arresto della turbina e la sua difficoltà nel sostenere la rotazione. Questa problematica è strettamente dipendente da tutte le altre sopra citate.

Buona tenuta globale della struttura.

Durante le prove dinamiche si è valutata la tenuta della struttura fino a venti di 20 m/s riscontrando un esito positivo a questo test. Strutturalmente quindi il VentolOne è in grado di sostenere sforzi elevati anche essendo costruito con materiali di scarsa qualità.

Mantenimento della rotazione.

Una volta raggiunta la velocità di rotazione nominale la turbina è stata in grado di mantenerla per tutta la durata delle prove anche in presenza di variazioni significative dell'intensità ventosa.

Ciò dimostra che la categoria di profili alari scelta s'addice con le esigenze del VentolOne.

Reattività della turbina.

Superato il range dove agisce la zona morta le prove dimostrano che la turbina VAWT è capace di aumentare rapidamente la sua velocità di rotazione in concomitanza con aumenti dell'intensità del vento.

In virtù delle prove effettuate si possono applicare per i futuri prototipi i seguenti correttivi:

- applicazione di un serraggio doppio nel collegamento tra pale e bracci in modo da annullare l'effetto del momento aerodinamico;
- introduzione di un controllo preliminare di qualità sui pezzi valutando ortogonalità, presenza di difetti geometrici, presenza di difetti strutturali;
- aumento dell'allungamento alare tramite la diminuzione della corda e l'aumento dell'apertura alare;
- diminuzione del rapporto di solidità della turbina.

12 CONCLUSIONI FINALI.

L'approvvigionamento energetico su scala globale rappresenta una delle principali tematiche d'interesse attuale, in quanto i combustibili fossili saranno sempre meno disponibili a fronte di una richiesta energetica sempre maggiore.

Per soddisfare questa continua richiesta di energia si stanno esplorando e sperimentando molteplici soluzioni che siano in grado di sopperire alla futura mancanza di combustibili fossili a basso costo e ad alta disponibilità.

A questo scenario globale non sfuggono i PVS, seppur con problematiche differenti legate al sostentamento energetico primario di comunità e famiglie, alla progressiva deforestazione di alcune aree, all'insorgenza di malattie legate ad uno sfruttamento errato di combustibili.

In questo contesto di ricerca di soluzioni alternative all'utilizzo di combustibili fossili si inseriscono le *tecnologie appropriate per l'approvvigionamento energetico* che cercano di conciliare il miglioramento della disponibilità energetica con il miglioramento della qualità ambientale, della qualità della vita, della capacità di autosostentamento delle comunità.

Il concetto di tecnologia appropriata non riguarda quindi solamente le tecnologie in senso stretto.

Lo studio eseguito sul micro-eolico auto-costruito ha dimostrato che esso può essere inserito nelle tecnologie appropriate a patto che risponda a determinati requisiti che sono:

- l'utilizzo di tale tecnologia in siti dove ci siano le condizioni ideali per lo sfruttamento della risorsa eolica, quindi dove l'intensità ventosa sia quantitativamente e qualitativamente disponibile,
- presenza di un'officina e di una struttura con attrezzature e materiali adeguati dove possa essere costruita una turbina micro-eolica;
- presenza di personale locale disposto a collaborare e consapevole del lavoro che sta andando a fare;
- basso costo;
- assenza di modificazioni rilevanti dal punto di vista ambientale;
- assenza di modificazioni rilevanti del tessuto sociale.

La tecnologia micro-eolica viene generalmente installata in zone dove non è presente la rete elettrica nazionale; questo fattore unito alla variabilità giornaliera e stagionale della risorsa eolica deve far prevedere l'accoppiamento dell'eolico con altre tecnologie quali il fotovoltaico, la trazione animale, l'utilizzo di un generatore diesel alimentato a biocarburante, in modo da compensare i periodi di tempo in cui la turbina eolica non è in grado di fornire energia.

Lo studio di una turbina eolica auto-costruita, il VentolOne, è stato pensato e realizzato cercando di rispondere a queste esigenze, a partire dalla costruzione impiegando interamente materiali di recupero ed attrezzature non industriali al fine di essere facilmente riproducibile nei PVS.

La costruzione della turbina non ha presentato problemi di grande rilevanza che ne impediscano la realizzazione in contesti arretrati tecnologicamente.

Si è reso necessario compiere delle prove volte alla comprensione qualitativa del funzionamento del VentolOne attraverso l'identificazione di massima di alcuni parametri quantitativi, consci dell'impossibilità di avere gradi di precisione industriali nell'eventuale realizzazione della turbina nei PVS.

Le prove effettuate hanno evidenziato dei problemi riguardanti le caratteristiche aerodinamiche della turbina (rapporto di solidità, allungamento alare, dimensioni del profilo) che ne impedivano il corretto funzionamento, riducendone notevolmente la velocità di rotazione che non riusciva ad avvicinarsi a quella teorica ipotizzata.

I materiali utilizzati per la costruzione della turbina dovranno essere qualitativamente migliori rispetto a quelli utilizzati, poiché i difetti presenti ne hanno diminuito le prestazioni. Ciò non significa non poter costruire una turbina con materiali di recupero, ma che questi materiali dovranno essere opportunamente selezionati.

Il VentolOne con queste caratteristiche aerodinamiche non può essere sfruttato per la produzione di energia elettrica e meccanica ma in base ai risultati conseguiti si pone come ottima base di partenza per successivi sviluppi, chiarendo che la tecnologia Darrieus VAWT auto-costruita ha ampi margini di miglioramento che ne consentiranno la diffusione in realtà arretrate.

Una volta migliorato il VentolOne si dimostra adatto ad un inserimento nei PVS rispondendo ai requisiti che una tecnologia appropriata deve necessariamente avere.

Questa Tesi ha dimostrato che è possibile costruire una turbina micro-eolica che risponda ai requisiti di sostenibilità partendo da tecnologie, conoscenze e risorse limitate raggiungendo risultati soddisfacenti.

La chiave di lettura di questa Tesi di Laurea sta nell'uscire dai normali schemi di pensiero ed imparare a pensare che è possibile affrontare delle problematiche tecniche, ambientali e sociali in un modo differente dalle pratiche comuni, un modo nel quale chiunque può sentirsi libero di sperimentare soluzioni alternative che rispondano ai suoi bisogni e siano al passo con le necessità presenti su scala globale.

13 BIBLIOGRAFIA.

- G. Frontini, *Aeromotore 3.4.5. dalla progettazione al test*, a cura del CAST Centro per un Appropriato Sviluppo Tecnologico, Laveno (VA), Cooperativa editoriale “Nuova Brianza”, 1987;
- G. Lardinelli, *Aerotecnica Vol 1*, Mario Stavolta editore, 1992;
- G. Lardinelli, *Aerotecnica Vol 2*, Mario Stavolta editore, 2003;
- G. Lardinelli, *Aerotecnica Vol 3*, Mario Stavolta editore, 2003;
- A.v. Vilsteren, *Aspects of irrigation with windmills*, tool SWD, 1981;
- A.R. Bibbo, *Costruzioni Aeronautiche*, IBN Editore, 2002;
- N.C.K. Pawsey, *Development and evaluation of passive variable pitch vertical axis wind turbine*, tesi di dottorato, University of New South Wales, 2002;
- D. Cocco, C. Palomba, *Dispense “Energia eolica” capitolo 2*, Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, 2008;
- G. Ruggieri, *Dispense corso di “Macchine per l'energia e per l'ambiente”*, Università degli Studi dell'Insubria, Dipartimento Ambiente Salute Sicurezza, 2009;
- A. Brusa, E. Guardone, E. Smedile, *Dossier Micro-eolico*, Progetto Res & Rue Dissemination, 2004;
- L. Paoli, *Energie rinnovabili. Impieghi su piccola scala*, Editrice Il Rostro 2006;
- B.K. Kirke, *Evaluation of self starting Vertical Axis Wind Turbine for stand alone application*, Griffith University, 1998;
- H.J.M. Beurskens, *Feasibility study of windmills for water supply in Mara Region, Tanzania*, tool SWD, 1978;
- L. Paoli, *La progettazione del mulino a vento*, Editrice Il Rostro, 2000;
- A. Bertolazzi, *Le energie rinnovabili*, Hoepli, 2006;
- D. Coiante, *Le nuove fonti di energia rinnovabile*, Franco Angeli Editore, 2004;
- L. Pirazzi, R. Vigotti, *Le vie del vento. Tecnica, economie e prospettive del mercato dell'energia eolica*, Franco Muzzio Editore, 2004;
- E. Busano, *L'impatto socioculturale dell'innovazione tecnologica: studio di un caso in Burkina Faso*. Tesi di Laurea, Università degli studi di Torino, Facoltà di Scienze Politiche, 2008;
- *Meteorologia*, Atlanti scientifici Giunti, 2007;

- *Pompare acqua col vento*, quaderni del COSV sulle Tecnologie Appropriate, Clup, 1983;
- J.DeCoste, D.McKay, B.Robinson, S.Whitehead, S.Wright, *Self starting vertical axis wind turbine*, Mechanical Engineering Dalhousie University, 2006;
- A. Caffarelli, G. de Simone, M. Stizza, A. D'Amato, V. Vergelli, *Sistemi eolici: progettazione e valutazione economica*, Maggioli Editore, 2009;
- G.Ciampaglia, *Tecnologia dei materiali compositi meccanici ed aeronautici*, IBN editore, 1991;
- L.Lazauskas, *Three pitch control systems of vertical axis wind turbine compared*, 1992;
- M. Patel, *Wind and solar power systems: design, analysis and operation*, Taylor & Francis Group, 2006.

14 SITOGRAFIA.

- <http://www.afriwea.org>
- <http://www.awea.org>
- <http://www.cantierino.it/AProgetti/generatore/wood103.html>
- <http://www.casasoleil.it/energieRinnovabili/micro-eolico.htm>
- <http://www.ecoblog.it>
- <http://www.energia-eolica.it/>
- <http://www.energiadalvento.com>
- <http://www.energeticambiente.it>
- <http://www.energy21.be/index.html>
- <http://www.eolprocess.com/>
- <http://www.esha.be>
- <http://www.ewea.org>
- http://www.fisica.unige.it/atmosfera/www_eng/vento/vento.htm
- <http://firstlook.3tiergroup.com/>
- <http://www.fontialternative.info/energia-alternativa/energia-eolica.asp>
- <http://www.iea.org>
- <http://www.inventiamoci1sviluppo.wordpress.com>
- <http://www.kitegen.com>
- <http://www.lakebracciano.com/eolico/>
- <http://www.lombardinifim.it>
- http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/jf_applet.htm
- <http://www.nautica.it>
- <http://www.otherpower.com/>
- <http://www.ropatec.com>
- <http://www.terom.it/ASP/Pages/ita/News.asp>
- <http://www.thebackshed.com/>
- <http://www.truewind.com/>
- <http://www.utopie.it>
- <http://www.vencopower.com/power-calculator.html>

- <http://williamkamkwamba.typepad.com/>
- <http://www.wikipedia.com>
- <http://www.windstuffnow.com/>
- <http://www.windpower.org/en/core.htm>
- <http://www.worldbank.org>
- <http://www.youtube.com>