



POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica

Tesi di Laurea

**VALUTAZIONI ENERGETICHE DELL'EOLICO  
D'ALTA QUOTA: KITE GEN**

Relatori:  
Prof. Ing. Evasio Lavagno  
Prof. Ing. Mario Milanese

Candidato:  
Salvatore Marco Ragusa

Dicembre 2007

# INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>1</b>
i    Contesto energetico .....	1
ii   Protocollo di Kyoto .....	3
iii  Commissione europea .....	3
iv   Fonti rinnovabili.....	4
v    Energia eolica.....	7
vi   Legge di Betz.....	8
<b>1    PROGETTO KITE GEN .....</b>	<b>13</b>
1.1  La tecnologia .....	13
1.2  Il funzionamento.....	14
1.3  Stato della ricerca .....	17
<b>2    METODOLOGIA DI CONFRONTO.....</b>	<b>19</b>
2.1  Parametri .....	19
2.2  Wind turbine di confronto .....	22
2.3  Definizione metodo .....	23
<b>3    DATABASE DEL VENTO .....</b>	<b>25</b>
3.1  Soundings database RAOB .....	25
3.2  Scelta siti.....	28
<b>4    INTENSITÀ DEL VENTO .....</b>	<b>29</b>
4.1  Velocità media .....	29
4.2  Frequenza intensità del vento.....	33
<b>5    VALUTAZIONI ENERGETICHE .....</b>	<b>39</b>
5.1  Availability .....	39
5.2  Fattore di utilizzazione.....	40
5.3  Confronto .....	41
<b>CONCLUSIONE.....</b>	<b>42</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>44</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>45</b>



# Introduzione

In una congiuntura storica caratterizzata da un crescente prezzo del petrolio e una sempre maggiore consapevolezza dei problemi ambientali, lo sviluppo di tecnologie alternative ed il loro utilizzo diventano una necessità più che una sfida.

Tra i progetti più promettenti ed innovativi il Kite Gen, sviluppato da un cofinanziamento di Kite Gen Research, Dipartimento di Automatica ed Informatica del Politecnico di Torino e dalla Regione Piemonte, si propone di competere non solo con l'attuale industria eolica, ma di confrontarsi direttamente con i combustibili fossili.

I motivi principali per tali miglioramenti sono svariati. Il generatore Kite Gen è una centrale eolica ad asse di rotazione verticale. La suddetta configurazione elimina i problemi statici e dinamici che impediscono l'aumento di altezza delle torri e quindi della potenza degli aerogeneratori tradizionali, che sono ad asse orizzontale e quindi sottoposti a forti momenti ribaltanti dovuti alla pressione del vento sulle pale. Inoltre, a parità di costo dell'impianto, il Kite Gen intercetta un fronte vento notevolmente più ampio di una wind turbine tradizionale, e a quote sul livello del suolo non raggiungibili dalle torri eoliche.

La presente tesi mira a valutare la resa energetica della tecnologia Kite Gen attraverso il calcolo del fattore di utilizzazione (capacity factor) e dell'availability e il confronto con quelli di un aerogeneratore tradizionale. Il calcolo viene effettuato utilizzando i dati storici della velocità del vento estratti dall'archivio RAOB e riferiti a sei diversi siti, dimostrando le potenzialità dello sfruttamento dell'energia eolica d'alta quota attraverso il Kite Gen.

## **i Contesto energetico**

Tra il 1850 e il 1970, il numero degli abitanti della Terra è triplicato e il consumo energetico è aumentato di 12 volte. Dal 1970 al 2002 la popolazione del pianeta è aumentata di un ulteriore 68% e il consumo di combustibili fossili del 73%. Il consumo energetico ha alimentato la crescita economica e viceversa, anche se i due fenomeni non sono così strettamente correlati come



un tempo si credeva. Quando agli inizi degli anni '70 i prezzi del petrolio salirono improvvisamente alle stelle, la reazione dei governi e dei consumatori fu quella di introdurre standard di efficienza e di ridurre i consumi di combustibile. Come conseguenza tra il 1970 e il 1997 l'intensità energetica globale è diminuita del 28%, sebbene la produzione economica sia continuata a crescere, sconfessando l'utilizzo di energia come requisito indispensabile del progresso. Tuttavia il consumo di energia, in modo particolare quello del petrolio, è in costante aumento, ad eccezione di una lieve flessione verificatasi durante la crisi petrolifera degli anni '70. Una diminuzione del consumo energetico si è avuta solo nei Paesi dell'Europa dell'Est e dell'ex blocco sovietico, mentre i Paesi industrializzati continuano tutt'oggi a consumare gran parte del petrolio globale, circa il 62%.

Il panorama economico-energetico mondiale è afflitto da numerose disparità. Un terzo della popolazione mondiale non ha infatti accesso all'elettricità o ad altre risorse energetiche moderne, l'altro terzo ne ha solo in modo limitato. Di questi, 2,5 miliardi hanno a disposizione solo legno o altre biomasse per produrre energia. D'altra parte un americano medio consuma 5 volte più energia del cittadino globale medio. Tuttavia è una situazione in evoluzione, secondo alcuni studi un numero sempre maggiore di persone nel "sud" del mondo consuma la stessa quantità di energia degli abitanti del "nord", e valutando i loro redditi appare evidente che crescano in modo molto più rapido di quanto si sia mai verificato nei Paesi industrializzati. La Cina è già il primo Paese mondiale per consumo di carbone e il terzo per il petrolio, mentre il Brasile occupa il sesto posto, l'India l'ottavo e il Messico il decimo. A breve termine, la popolazione dei Paesi in via di sviluppo sarà sempre più condizionata dalla scarsità delle risorse e dalle realtà ambientali. La Terra non può produrre abbastanza perché tutti possano vivere come l'americano o l'europeo medio. Secondo stime recenti se ogni cinese consumasse la stessa quantità di petrolio che viene bruciata dall'americano medio, la Cina avrebbe bisogno di 90 milioni di barili al giorno e cioè 11 milioni in più della produzione giornaliera mondiale del 2001.

In futuro, l'incremento demografico, il problema del surriscaldamento globale di origine antropologica e altre criticità ambientali rischieranno di portare il sistema Terra al collasso, e senza ombra di dubbio i combustibili



convenzionali non potranno soddisfare la crescita della domanda energetica prevista. [*State of the World 2004 'Consumi'*, 2004 - ISBN 88-89014-04-0 Worldwatch Institute]

## **ii Protocollo di Kyoto**

Nel dicembre del 1997, in occasione della Conferenza quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici a Kyoto, 160 Paesi hanno sottoscritto un trattato internazionale (Protocollo di Kyoto) volto a limitare le emissioni di gas inquinanti. In particolare prevede entro il 2012 l'obbligo da parte dei Paesi industrializzati di operare una riduzione della produzione di gas serra del 5% rispetto all'anno base 1990. Pur avendo molti difetti, non ultimi lo scarto tra il numero di Nazioni firmatarie e quello delle Nazioni che lo hanno ratificato in legge e la discutibile eccezione per i Paesi in via di sviluppo esenti da limiti, il Protocollo di Kyoto è il primo vero documento politico ad azioni vincolanti che riflette una consapevolezza ambientalistica globale.

I provvedimenti mirati al rispetto degli impegni sottoscritti sono indirizzati soprattutto alla limitazione dell'utilizzo di combustibili fossili, principale sorgente del più influente gas serra: l'anidride carbonica.

Per quanto riguarda la situazione italiana, le emissioni dovranno essere ridotte del 6,5% imponendo di puntare con decisione sullo sviluppo di tecnologie CO<sub>2</sub>-free. Nello scenario di incrementare la produzione di energia elettrica attraverso la fonte eolica tradizionale, si prevede un investimento di circa 40'000 miliardi per passare dal contributo degli attuali 0,007 Mtep al valore soglia di 1,32 Mtep.

## **iii Commissione europea**

Una ulteriore spinta verso le fonti rinnovabili è stata data dall'Unione Europea.

Nel marzo 2007 il Consiglio Europeo ha posto un obiettivo generale vincolante per i paesi membri il quale prevede, entro il 2020, un limite di produzione di energia elettrica da rinnovabili pari al 20% del consumo.

Il 25 settembre il Parlamento Europeo ha approvato una risoluzione sulla



“tabella di marcia per le energie rinnovabili in Europa”. In essa è contenuta l'invito alla Commissione a proporre entro fine 2007 un quadro legislativo volto a rafforzare il ruolo delle energie rinnovabili, attraverso strumenti normativi e finanziari agenti sulla ricerca e sul costo di vendita, in modo da garantirne la priorità già nel bilancio 2007-2013. Tra le tecnologie segnalate come promettenti ed impegnative viene considerato l'eolico d'alta quota.

#### **iv Fonti rinnovabili**

Tecnicamente vengono dette energie rinnovabili quelle fonti di energia che per loro caratteristica intrinseca si rigenerano o non sono "esauribili" nella scala dei tempi "umani" o comunque così sono percepite dall'uomo o dalla società, più in particolare la velocità di generazione è superiore alla velocità di utilizzo.

Il graduale sviluppo della tecnologia delle rinnovabili, accoppiato al progressivo aumento dei prezzi del petrolio, ha enormemente ridotto il gap di convenienza economica tra le due. Allo stesso tempo, è stato perfezionato il metodo di analisi basato sul “ciclo di vita” (LCA) che permette di determinare la resa energetica (EROI) e di confrontare le tecnologie su basi oggettive e non legate alle oscillazioni economiche del momento o sul supporto occulto o palese dei governi.

Le principali critiche legate alle attuali tecnologie rinnovabili sono perlopiù dovute alla scarsa disponibilità produttiva lungo l'anno, ovvero un basso valore di availability intesa come ore di funzionamento a potenza nominale su base annuale. Le risorse che vengono sfruttate hanno per la loro stessa natura un andamento ciclico o debolmente prevedibile determinando, nel caso di un loro massiccio impiego, l'impossibilità di gestire l'equilibrio nella rete di distribuzione tra l'energia richiesta e quella prodotta, esiste quindi un limite massimo per quanto riguarda la penetrazione energetica.

Si riportano alcune statistiche riguardo il panorama energetico mondiale, in modo da poter fotografare il contesto e collocare con esattezza la presente analisi.

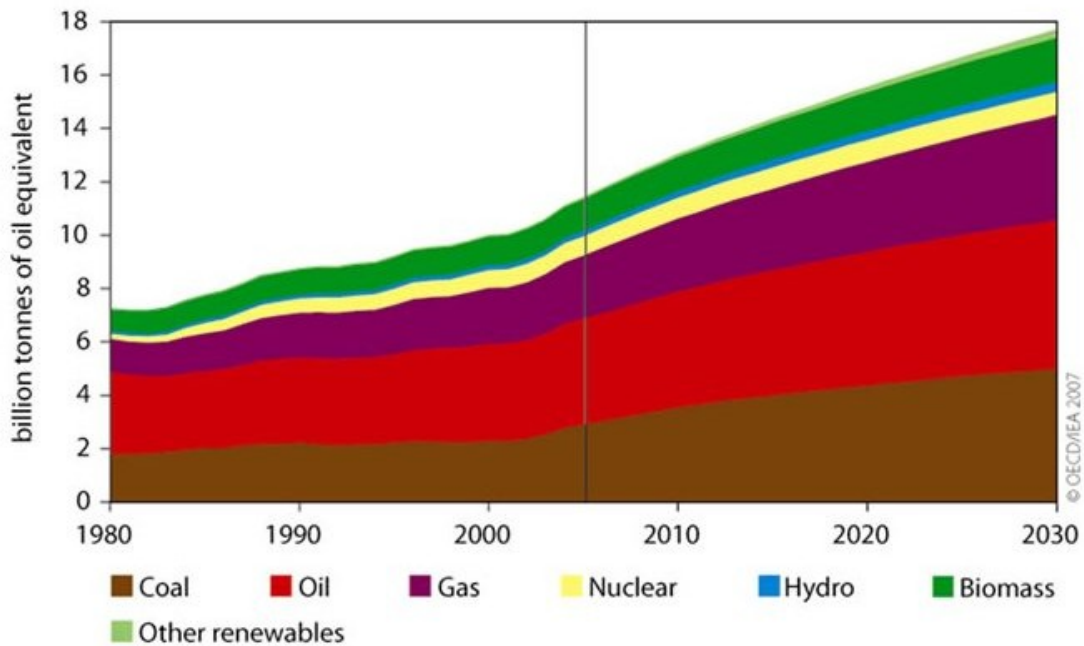


Fig.1 Mix di energia primaria mondiale e scenario futuro secondo l'IEA

E' evidente che il ruolo delle energie rinnovabili nel panorama mondiale, secondo le stime effettuate dall'International Energy Agency, rimarrà marginale. Non sembrano nemmeno incidere nelle previsioni i possibili utilizzi di biomasse e biocombustibili a scopo trasporto, appare inoltre completamente esaurita la crescita dell'idroelettrico, causa saturazione bacini sfruttabili.

L'energia da fonte nucleare, nell'attesa di colpi di scena sul campo della fusione, non decolla e viene invece considerata come costante.

L'aumento di richiesta energetica avverrà pertanto quasi completamente a spese dei combustibili fossili, con una crescita costante di carbone, petrolio e gas naturale.

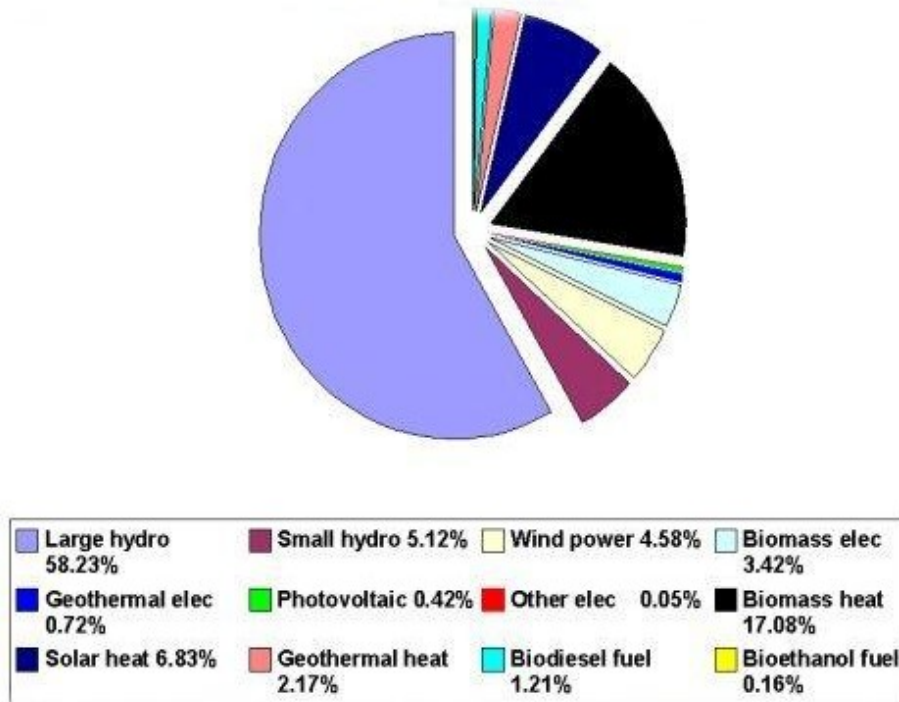


Fig.2 Produzione di energia da fonti rinnovabili nel 2005

Il risultato dello zoom sulla porzione di energia ottenuta da fonti rinnovabili effettuato da Ren21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) evidenzia qual è il peso a livello mondiale di ogni tecnologia. Se si esclude il calore ottenuto da legno e si considera che le centrali idroelettriche hanno superato il picco d'installazione in Italia come negli altri Paesi Europei, non si può registrare una tecnologia alternativa predominante.

Se si restringe l'indagine ad alcune Nazioni, si evidenzia come l'eolico venga spesso scelto come quasi unica fonte rinnovabile.

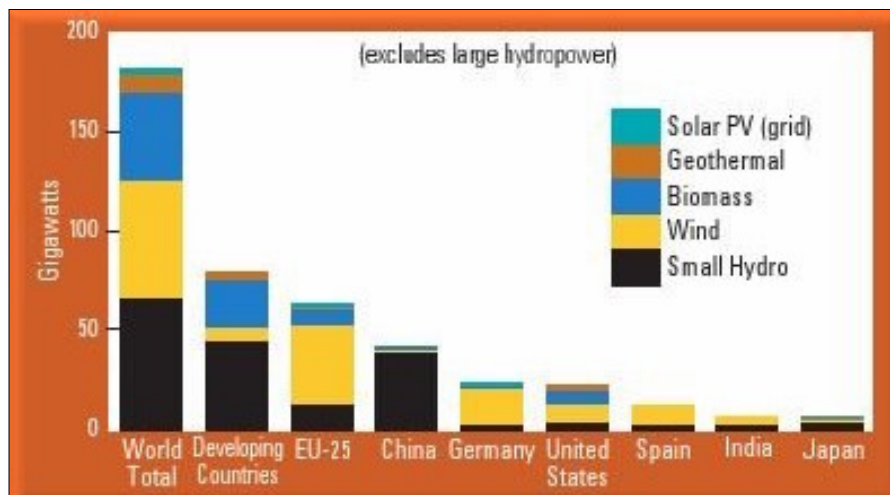


Fig.3 Potenza installata da energia rinnovabile nel 2006

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica in Italia, le fonti rinnovabili hanno un peso nel mix totale di circa il 14% su di un consumo nazionale netto di 330.000 GWh.

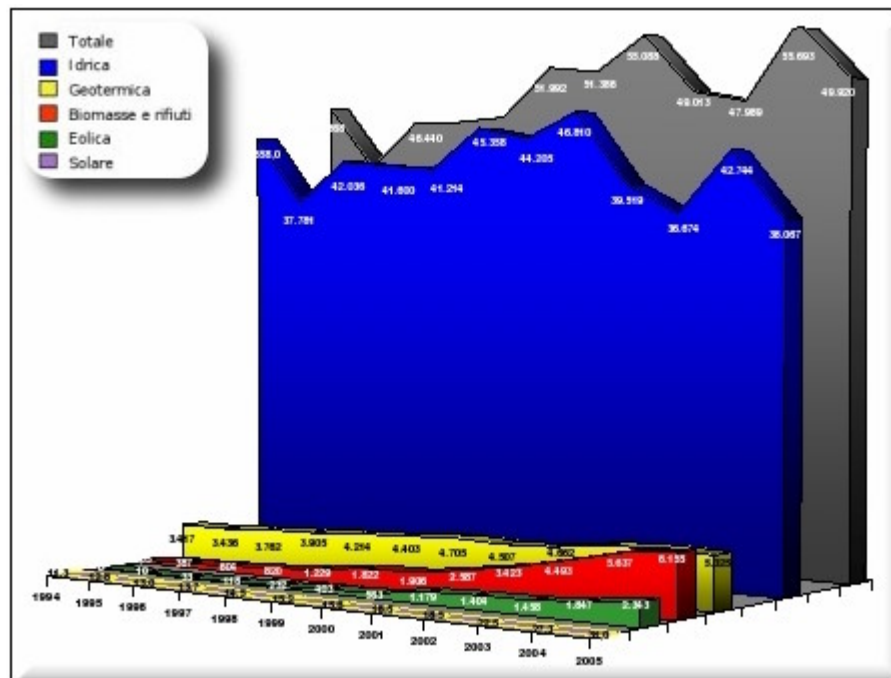


Fig.4 Produzione e. elettrica da fonte rinnovabile in Italia dal 1994-2005 in Gwh (GRTN)

## v Energia eolica

L'energia eolica è il prodotto della conversione dell'energia cinetica del vento in altre forme di energia. Prima tra tutte le fonti rinnovabili per il rapporto costo/produzione, è stata anche la prima usata dall'uomo. In passato l'energia del vento è stata sfruttata immediatamente sul posto come forza motrice per applicazioni industriali e pre-industriali. Attualmente viene in larga scala convertita in elettricità tramite centrali eoliche, costituite da un certo numero di aerogeneratori collocati su torri. La risorsa vento infatti è distribuita nell'atmosfera con intensità crescente all'aumentare dell'altitudine e concentrata soprattutto in due nastri di vento che avvolgono completamente la Terra sopra al parallelo che passa sulla Patagonia nell'emisfero australe e l'altro che passa sull'Europa. La potenza media posseduta da questo nastro che va da circa 500 metri fino a 10'000 metri di altitudine e si estende per 4-5'000 chilometri in larghezza è stimata intorno ai 2 kW al metro quadrato.



## vi Legge di Betz

Maggiore è l'energia cinetica che la turbina riesce ad estrarre dal vento e maggiore è la diminuzione di velocità del vento che lascia la turbina. Il vento viene quindi frenato, in modo che la velocità del vento a valle è compresa tra zero e il valore di velocità a monte (per entrambi questi casi limite la potenza estratta sarebbe nulla). Una turbina eolica ideale rallenta il vento di un fattore  $2/3$  rispetto alla velocità a monte della turbina. Questo dato è il frutto della legge di Betz, secondo la quale si può convertire meno di  $16/27$  (o 59%) dell'energia cinetica del vento in energia meccanica usando una turbina eolica.

Le ipotesi alla base della teoria di Betz sono le seguenti:

1. Concetto di tubo di flusso: il tubo di corrente che attraversa il disco attuatore non interagisca con la restante porzione di fluido che lo circonda.
2. In ogni sezione del tubo di flusso sussista una distribuzione di velocità permanente, uniforme e monodimensionale lungo l'asse. Il rallentamento di vena sul disco attuatore è distribuito uniformemente sulla sezione del disco.
3. Nelle sezioni infinitamente a monte e a valle si possa ritenere una situazione fluidodinamica indisturbata dalla presenza della macchina, ovvero sussista la pressione atmosferica dell'ambiente esterno, proprio come nella condizione di getto libero.
4. Il flusso eolico non incontri ostacoli oltre la turbina, né sopravento né sottovento.
5. Il vento sia stazionario e di intensità costante con la quota.
6. Non ci siano effetti di rotazione della vena a causa dell'"estrazione" di quantità di moto.
7. Si trascuri la comprimibilità dell'aria, cioè la densità sia ritenuta costante.

La vena fluida, caratterizzata da una velocità  $v_1$ , raggiunge le pale del rotore. Lì essa viene rallentata fino al raggiungimento di una velocità  $v_2$ . Naturalmente nel passaggio da 1 a 2 deve valere l'equazione di continuità, per cui si può scrivere (supponendo la densità costante per l'ipotesi 7):

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \dot{m}$$

Deve essere verificata anche l'equazione di conservazione della quantità di moto per cui:



$$F = \dot{m} \cdot (v_1 - v_2)$$

F è la forza (orizzontale) esercitata dal flusso sulla macchina (da intendersi come media temporale della forza nell'arco di una rivoluzione completa del rotore).

La potenza è dunque:

$$P = F \cdot v = v \cdot \dot{m} \cdot (v_1 - v_2)$$

Facendo un bilancio tra entrata e uscita dell'energia cinetica associata alla vena fluida si trova la potenza ceduta:

$$P = \dot{m} \cdot \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

ma, poiché le potenze trovate nei due modi devono coincidere, si ricava

$$v = (v_1 + v_2) / 2$$

Il rallentamento avviene dunque, per metà nel tratto di corrente a monte e per metà nel tratto di corrente a valle del disco attuatore.

Definendo un fattore di interferenza a come:

$$a = 1 - v / v_1 = (v_1 - v) / v_1$$

si ottiene  $v = v_1 (1 - a)$ , ma poiché  $v = (v_1 + v_2) / 2$  si ha  $v_2 = v_1 (1 - 2a)$

Il fattore a rappresenta la misura in cui il flusso viene rallentato a monte della turbina (al massimo  $a = 0.5$  quando si ha il blocco del flusso alla sezione 2 di uscita).

Sostituendo l'equazione trovata per la velocità  $v_2$  nell'espressione della potenza si ottiene la potenza estraibile da un flusso eolico secondo la teoria di Betz:

$$P = \frac{1}{2} A \rho v_1^3 4a(1-a)^2$$

La forza agente sul rotore è quindi:

$$F = \frac{1}{2} A \rho v_1^2 4a(1-a)$$



Imponendo l'annullamento della derivata prima di P rispetto ad a si può trovare l'interferenza ottimale (l'interferenza per cui si ha l'estrazione della massima potenza):

$a = 1$  oppure  $a = 1/3$ . Il valore  $a=1$  non ha senso per cui  $a_{ott} = 1/3$

Si può definire un coefficiente di prestazione come rapporto tra la potenza P e la potenza  $P_o$  valutata nella vena di fluido indisturbata:

$$P_o = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$c_p = \frac{P}{P_o} = \frac{\frac{1}{2} \rho A v_1^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} \rho A v_1^3}$$

il valore del coefficiente di prestazione per  $a = 1/3$  è  $C_p \max = 16/27 \approx 0.59$ . Si può dunque sottrarre al massimo il 59% della potenza associata alla vena fluida.

Il coefficiente di prestazione infatti si può scrivere in funzione del rapporto di velocità  $v_2/v_1$

$$P/P_o = (1/2) (1 - (v_2/v_1)^2) (1 + v_2/v_1)$$

Tale funzione è riportata in figura e, come si vede, presenta il suo massimo per  $v_2/v_1 = 1/3$  e il massimo della potenza estraibile è circa il 59% della totale potenza del vento.

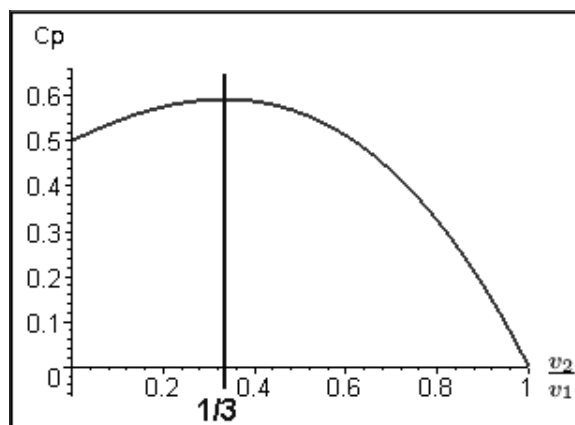


Fig.5 Andamento del coefficiente di performance al variare di  $v_2/v_1$



Le perdite al rotore risultano essere quindi la parte più significativa delle perdite complessive di un aerogeneratore. I moderni rotori raggiungono valori di  $C_p$  tra 0.4 e 0.5, che rappresentano il 70-80% della potenza teorica massima possibile.

Si evidenzia infine che la forza che agisce sul rotore e che quindi tende a ribaltare la windturbine è:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho A v_1^2 4a(1-a)$$

ovvero funzione dell'area e del quadrato della velocità.

Le centrali eoliche, per produrre quantità di energia apprezzabili, devono essere costituite da un numero consistente di generatori eolici, disposti ad una certa distanza per poter sfruttare il vento e per evitare "effetti d'ombra". Solitamente il fattore di utilizzazione è molto basso (sotto il 20%) a causa della discontinuità del vento. Dunque, a parità di potenza nominale installata, una centrale eolica produce un sesto di una centrale nucleare ed un quinto di una centrale a gas, richiedendo in compensazione, un sovradimensionamento ed un sovracosto pari a 6 volte quello nominale per ottenere le stesse prestazioni effettive.

Lo sfruttamento mondiale dell'energia eolica è sintetizzato attraverso la classifica delle nazioni in base alla potenza totale installata stilata dal GWEC, il Global Wind Energy Council:

	MW	%
Germany	20,622	27.8
Spain	11,615	15.6
US	11,603	15.6
India	6,270	8.4
Denmark	3,136	4.2
China	2,604	3.5
Italy	2,123	2.9
UK	1,963	2.6
Portugal	1,716	2.3
France	1,567	2.1
Rest of the world	11,005	14.8
<b>Total top 10</b>	<b>63,218</b>	<b>85.2</b>
<b>Total</b>	<b>74,223</b>	

Fig.6 Classifica mondiale potenza eolica installata 2006 (GWEC)

Per quanto concerne l'andamento futuro, ipotizzato in base agli attuali trend e agli ordini commissionati agli operatori del settore, si può notare nel grafico redatto dalla WWEA, World Wind Energy Association, un incremento sempre più marcato che porterebbe addirittura al raddoppio della potenza in un periodo di quattro anni.



*Fig.7 Andamento passato e futuro della potenza installata nel mondo (WWEA)*

# 1 Progetto Kite Gen

## 1.1 La tecnologia

Il Kite Gen è un progetto che si occupa dello studio ed elaborazione di una tecnologia innovativa per la realizzazione di impianti industriali di produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile.

L'idea che sta alla base è lo sfruttamento dell'energia eolica d'alta quota catturata attraverso una resistente e leggera struttura formata da profili alari di potenza, denominati Power Kites. I quali sono fissati a coppie di cavi in materiale polimerico ancorati a strutture fisse o mobili posizionate a suolo. I cavi hanno il duplice ruolo di trasmettere la trazione e contemporaneamente controllare il volo dei profili alari.

L'eolico tradizionale riesce appena a scalfire, in pochi punti favorevoli, la superficie dell'enorme giacimento d'energia rappresentato dal vento. Le torri eoliche infatti non possono spingersi più in alto e arrivare ai venti in quota, in quanto sono già prossime al loro limite dimensionale. Infatti le più grandi torri eoliche hanno rotori di 90-100 metri di diametro e la struttura che li sorregge diventa, al crescere dell'altezza, esponenzialmente più pesante.

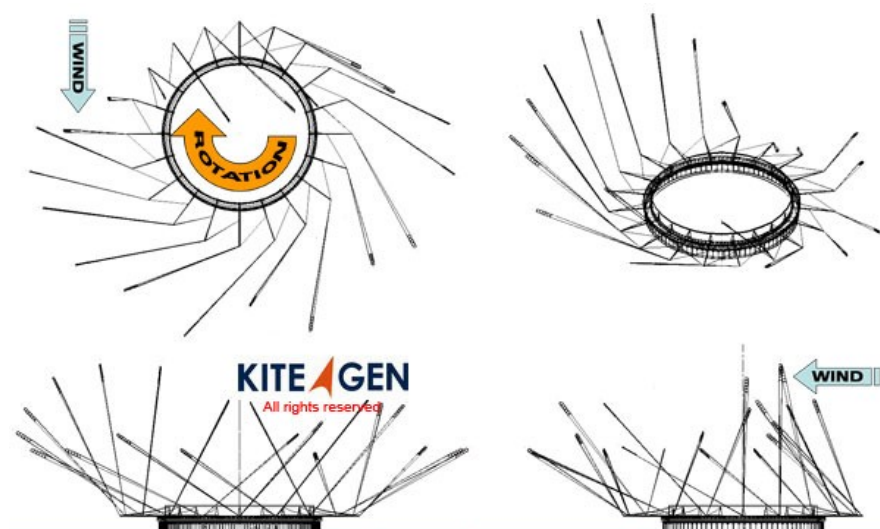


Fig.8 Kite Gen, illustrazione artistica fuori scala.



L'essenza del concetto Kite Gen è paragonabile a quello di una torre eolica nella quale rimangono i soli componenti veramente necessari, ossia le ali ad alta velocità e il generatore, questo convenientemente spostato al suolo. La struttura risultante, comprese le fondamenta a terra, è molto più leggera e economica, e permette di catturare il vento a quote fino a 800-1000 metri di altezza

L'obiettivo principale del progetto è di dimostrare che sia possibile, in tempi relativamente brevi, realizzare con la tecnologia Kite Gen impianti di generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili con costi inferiori a quelli ottenibili attualmente da fonti fossili e con occupazione di territorio notevolmente inferiore a quello relativo alle torri eoliche.

## 1.2 Il funzionamento

La tecnologia chiave del Kite Gen è il KSU, ovvero l'unità di controllo dei profili alari di potenza (Kite Steering Unit, vedi Fig.9), composto da due attuatori elettrici in grado di funzionare sia da motori che da generatori elettrici. L'aquilone è fissato ad una coppia di cavi, uno per estremo, ed i cavi sono arrotolati a due verricelli accoppiati agli attuatori. Il KSU è inoltre dotato di sensori di terra e di bordo. Le variabili che vengono misurate sono la direzione e la velocità del vento, le coordinate del profilo alare ed i suoi valori di velocità ed accelerazione. Sulla base dei segnali ottenuti dai sensori, l'unità di controllo permette di guidare in modo automatico la traiettoria del kite attraverso una centralina che massimizza la generazione di energia.

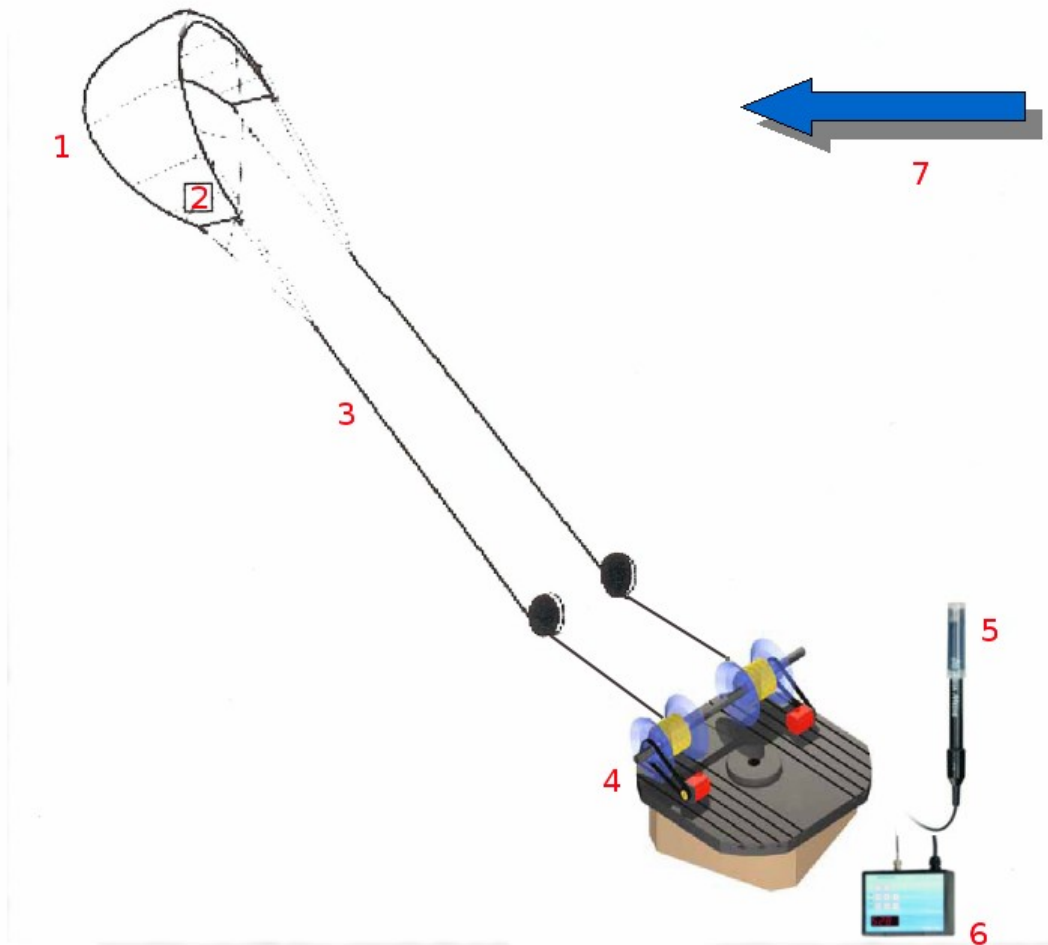
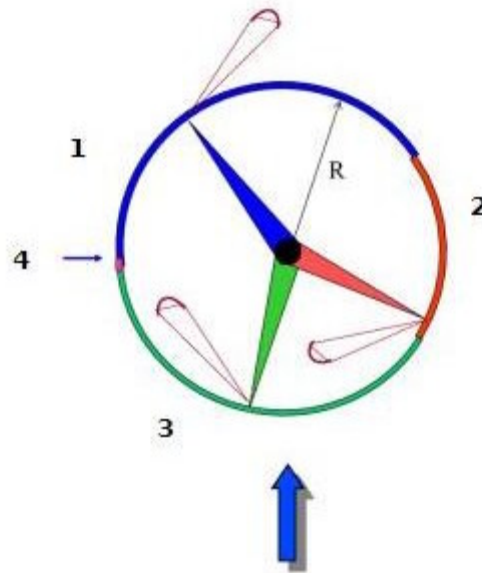


Fig.9 Sistema di controllo automatico del volo

I componenti costituenti il KSU sono:

1. profilo alare
2. sensori di bordo (posizione e orientamento relativo)
3. cavi
4. unità di attuazione (motori, verricelli)
5. sensori di terra (direzione e velocità vento, tensione cavi..)
6. centralina
7. direzione vento

Utilizzando più moduli KSU mobili si ottiene la configurazione a “carosello”, il cui principio di funzionamento è quello di controllare la traiettoria di ogni singolo kite in grado di massimizzarne la resa e trascinare a terra, lungo un percorso circolare, le unità di manovra.



*Fig.10 Schema del ciclo di funzionamento “a carosello”*

il ciclo può essere scomposto in 4 fasi:

1. trazione con mura a destra
2. sospensione trazione, riposizionamento, cambio mura
3. trazione con mura a sinistra
4. cambio mura

L'energia è data dal traino di ogni unità di manovra lungo la circonferenza. Si può notare in figura che l'arco di circonferenza dedito alla fase di recupero, rappresentato in rosso, è di gran lunga minore rispetto all'intero percorso. Inoltre variando la direzione del vento, il Kite Gen può adattarsi senza soluzione di continuità facendo variare gli angoli ai quali avvengono le manovre. La complessa azione di pilotaggio viene effettuata da un sistema computerizzato denominato "Fast Implementation of Predictive Controller".

### 1.3 Stato della ricerca

I risultati ottenuti durante la ricerca “Controllo di aquiloni di potenza per la generazione eolica di energia”, finanziato dalla Regione Piemonte al Dipartimento di Automatica e Informatica del Politecnico di Torino sui Fondi 2004, e attualmente in fase di conclusione, sono molto incoraggianti. In particolare è stata realizzata una unità di controllo del volo di profili alari, denominata KSU1, montata su un automezzo ribattezzato MobileGen, che ha già reso possibile di dimostrare la capacità di ricavare energia utilizzando il vento d'alta quota fino a 800 metri. La KSU1 permette di controllare il volo di un profilo alare in modo da sviluppare fino a 40 KW di potenza, attraverso fasi alternate di trazione dei cavi, durante le quali si genera energia, e di recupero degli stessi, durante le quali si consuma una piccola frazione della energia generata. Questa configurazione è stata denominata a “yo-yo”.

Più nello specifico durante l'estensione, ovvero l'allontanamento dell'aquilone fino alla quota massima, i cavi trasmettono ai verricelli dell'unità di controllo energia cinetica. Nella fase di recupero invece avviene il riavvolgimento riportando il kite alla quota di partenza. In questa fase si minimizza l'energia spesa sfruttando l'aerodinamica del profilo.



*Fig.11 Foto del Mobilgen in azione durante una prova sperimentale*



Nel triennio 2008-2010 il progetto Kite Gen si propone di:

- studiare, progettare e costruire un prototipo di impianto in grado di arrivare con una tecnologia modulare fino a 10 MW di potenza nominale, con un costo di generazione di 80-100 €/MWh e con una occupazione territoriale di raggio pari a 700 m.
- dimostrare la scalabilità a impianti di grande potenza nominale, con importanti effetti di scala: impianto da 100 MW con costo di generazione di 30 €/MWh e con occupazione territoriale di raggio pari a 800 m; impianto da 1.000 MW con costo di generazione di 10 €/MWh e con occupazione territoriale di raggio pari a 1100 m.



## 2 Metodologia di confronto

### 2.1 Parametri

Nella classificazione di una turbina eolica sono indispensabili alcuni parametri. I più importanti alla luce del calcolo dell'energia prodotta, oggetto di questa trattazione, sono le dimensioni delle pale, l'altezza della torre e i seguenti dati di operabilità:

#### **Potenza nominale**

Per un impianto eolico è definita come la massima potenza sviluppabile in modo continuativo con vento costante.

#### **Velocità del vento nominale**

È la minima velocità alla quale l'aerogeneratore è progettato per sviluppare la potenza nominale, ovvero la massima raggiungibile.

#### **Velocità del vento di cut-in**

È la minima velocità del vento alla quale il rotore della macchina eolica si mette in rotazione e genera energia; nelle moderne wind turbine si è riuscito ad abbassare sempre di più questo valore, aumentando così la sfruttabilità dei venti. Ci sono macchine eoliche che hanno una velocità di cut-in di 4,5 – 5 m/s. Sebbene quelle di piccole dimensioni riescano ad essere operative già con una velocità del vento di 3 m/s, la potenza essendo proporzionale all'area spazzata dalle pale è minima.

#### **Velocità del vento di cut-out**

È la massima velocità del vento alla quale il rotore della macchina eolica può ruotare in sicurezza: a questa velocità viene frenato e poi fermato il rotore per non danneggiare il sistema. Solitamente si ha una velocità di cut-out di circa 25 m/s.



## Curva di potenza

Indica quanta potenza elettrica si può generare in uscita dalla turbina a differenti valori della velocità del vento. Teoricamente avrebbe un andamento discontinuo caratterizzato da una prima parte cubica compresa tra la velocità di cut-in e quella nominale, e da una seconda costante e pari al valore di potenza nominale fino alla velocità di cut-off. In realtà le curve di potenza vengono ottenute misurando la velocità del vento mediante un anemometro e la potenza elettrica in uscita dall'alternatore. In questo modo si considerano anche gli effetti peggiorativi dei rendimenti.

Nello studio di fattibilità per l'installazione di una centrale eolica la ventosità del sito riveste un ruolo fondamentale. Al fine di valutare la climatologia della velocità del vento in considerazione della sua variabilità si possono dare solo valutazioni statistiche. Utilizzando i dati storici di velocità del vento della località in osservazione, è possibile stimare la relativa funzione di densità di probabilità. Nella presente trattazione non si è fatto ricorso ad una modellizzazione precostituita, ma si è calcolata la frequenza di accadimento di ogni valore di velocità riferita al sito in esame. Conoscendo la curva di potenza di un aerogeneratore, si può quindi stimare l'energia mediamente prodotta nell'arco di un determinato periodo. Adottando come arco temporale l'intero anno e rapportando l'energia prodotta precedentemente calcolata con quella producibile se fosse sempre in funzionamento alla sua potenza nominale massima, si ottiene il **fattore di utilizzazione** (capacity factor).

Un ulteriore parametro molto utile per qualificare un impianto energetico è l'**availability**. Esso stima l'utilizzo effettivo di una centrale in termini di ore di funzionamento alla potenza nominale sulle 8760 ore annue.

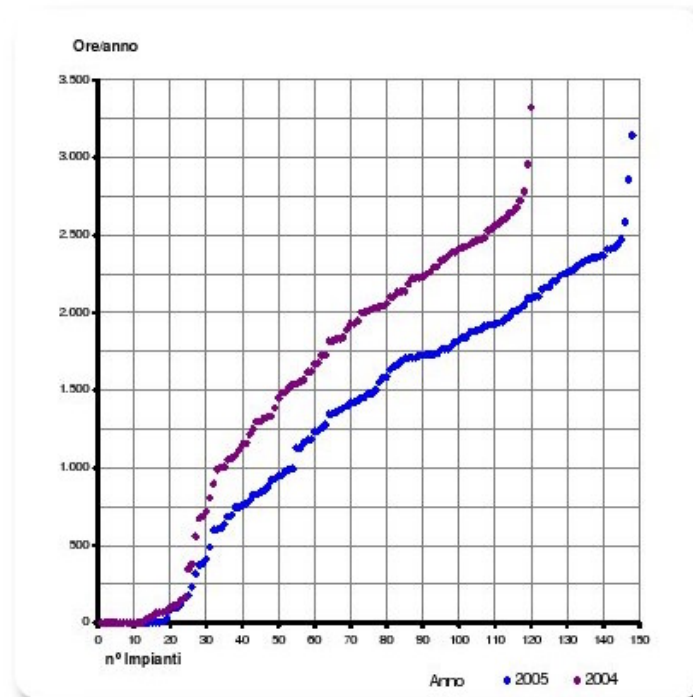


Fig.12 Availability cumulativo delle centrali eoliche sul territorio italiano (GRTN)

Nel precedente grafico vengono messi in relazione il numero di impianti funzionanti ad un valore inferiore o uguale di availability indicato in ordinata. Naturalmente maggiore è l'availability, maggiore è il quantitativo di energia prodotta e quindi minore, a parità d'investimento, è il costo di produzione dell'energia.

Il Kite Gen riesce a convogliare l'energia del vento a quote maggiori di quelle di una wind turbine dove a seconda della tipologia di suolo e alla posizione geografica si avranno valori di velocità superiori. Inoltre sviluppa la propria potenza nominale ad una velocità del vento inferiore a quella delle macchine eoliche tradizionali. Questo miglioramento è dovuto alla maggiore area complessiva intercettata dagli aquiloni rispetto a quella delle pale di una turbina.

## 2.2 Wind turbine di confronto

Il confronto con gli aerogeneratori tradizionale è stato effettuato prendendo in esame un prodotto dell'azienda danese Vestas, leader mondiale nella costruzione e installazione di windturbine con una quota di mercato del 28%. In particolare la Vestas V80-2.0, un modello di ultima generazione molto diffuso, caratterizzata da:

- diametro rotore 80 metri  
velocità vento di avvio 4 m/s  
velocità vento di arresto 25 m/s  
potenza nominale 2000 kW sviluppata alla velocità di 15 m/s.

L'altezza della torre può variare da 60 a 100 metri in relazione al sito e al modello in questione.

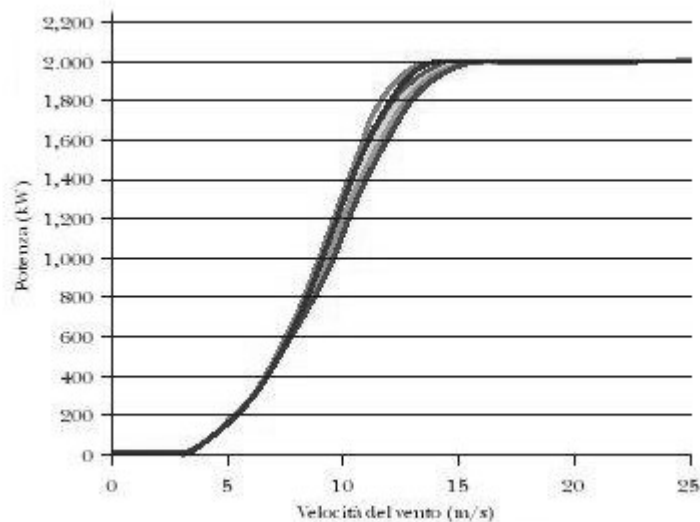


Fig.13 Curve di potenza della Vestas V80-2.0 a diversi valori di rumorosità



## 2.3 Definizione metodo

La valutazione della resa energetica delle tecnologia Kite Gen, ed il confronto con l'eolico tradizionale, è effettuata in termini di fattore di utilizzazione e di availability, calcolabili a partire dai valori di energia prodotta.

In base ad i parametri costruttivi e alla quota di funzionamento si identificano le aree di vento intercettate e si valuta l'intensità del vento per ogni sito in un periodo d'indagine.

Al fine di ottenere una maggiore accuratezza dei calcoli si è fatto riferimento a dati della curva di potenza misurati durante il funzionamento. I valori della potenza ai vari valori di velocità del vento della Vestas V80-2.0 sono stati ottenuti da uno studio della Danish Wind Industry Association.

Conservativamente si è utilizzato il valore di altezza della torre eolica massimo, in particolare:

- altezza hub 80 metri  
quota massima pale 120 metri  
quota minima pale 40 metri

Il Kite Gen utilizzato per il confronto è definito dai seguenti parametri:

- Kite Gen V9-2M  
velocità vento di avvio 4 m/s  
velocità vento di arresto 25 m/s  
potenza nominale 2000 kW sviluppata alla velocità di 9 m/s  
quota massima power kite 800 metri  
quota minima power kite 200 metri

Si è ipotizzato che la curva di potenza del Kite Gen segua l'andamento della Vestas, con il raggiungimento della potenza nominale anticipato alla velocità del vento di 9 m/s.

Questo valore può essere facilmente dimostrato utilizzando la legge di Betz, infatti se si impone la potenza nominale e si uguaglia la formulazione ipotizzando lo stesso coefficiente di prestazione e la stessa densità dell'aria si

ottiene

$$\frac{A_k}{A_v} = \frac{v_v^3}{v_k^3}$$

sostituendo i valori delle velocità nominali della Vestas e del Kite Gen, si evince che il fronte di vento intercettato dai profili alari debba essere  $(15/9)^3$  volte l'area spazzata dalle pale eoliche, ovvero maggiore di un fattore circa quattro. Considerando un ampio margine dovuto all'utilizzo di profili alari meno performati, vale a dire caratterizzati da un coefficiente di prestazione minore, il valore dell'area così stimato risulta essere facilmente raggiungibile anche a fronte delle limitazioni strutturali ed economiche.

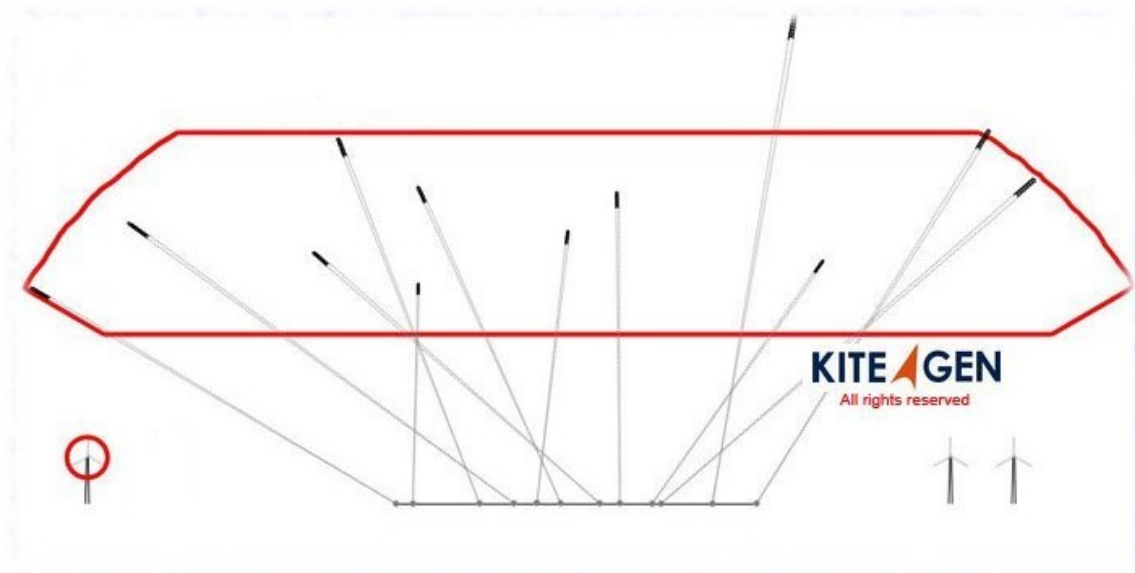


Fig.14 Confronto tra Kite Gen e aerogeneratore tradizionale

Ottenuta la distribuzione della frequenza del vento in un determinato periodo e conoscendo la curva di potenza si è calcolata l'energia prodotta e si è confrontato il fattore di utilizzazione e l'availability delle due tecnologie.

La metodologia del confronto è quindi basata sulla valutazione dell'energia media producibile dal Kite Gen e da una turbina eolica in un determinato periodo, attraverso il calcolo della potenza sviluppabile per ogni frequenza d'intervallo di velocità.

## 3 Database del vento

### 3.1 Soundings database RAOB

Una fonte cospicua di dati della velocità del vento in relazione alla quota è reperibile attraverso i radiosondaggi, ovvero la misure della distribuzione verticale delle proprietà fisiche della colonna atmosferica. I “soundings” costituiscono un’importante fonte d’informazione meteorologica.



*Fig.15 Fotografia di un pallone sonda*

Si utilizza un pallone aerostatico, che è in grado di raggiungere i 30.000 metri di altezza (3 volte la quota di volo di un aereo di linea), al quale vengono collegati strumenti di estrema precisione in grado di misurare pressione, temperatura e umidità dell'aria. Grazie ad un emettitore radio si può seguire lo spostamento del pallone rispetto al punto di lancio e calcolare quindi anche direzione ed intensità del vento alle varie quote, in questo caso particolare ci si riferisce alle *rawinsonde*. Si ottiene in questo modo un profilo verticale dell'atmosfera per pressione, temperatura, umidità e vento. I dati raccolti dalle sonde vengono utilizzati in correlazione a quelli delle stazioni meteo terrestri per creare le carte meteorologiche.



In tutto il mondo i siti di lancio delle radiosonde sono più di 800 e la maggior parte delle nazioni condivide i dati attraverso accordi internazionali. In linea di massima i lanci delle sonde avvengono alle 00:00 e alle 12:00 (UTC, ovvero il Tempo Coordinato Universale) per poter ottenere una fotografia istantanea dell'atmosfera, strumento indispensabile per i modelli numerici di previsione e studio meteorologico.

In Italia sono presenti 10 stazioni di radiosondaggi, ognuna delle quali effettua di norma 2 o 4 lanci al giorno:

- Milano - Linate
- Udine - Campoformido
- San Pietro Capofiume (Bologna)
- Cuneo - Levaldigi
- Pratica di Mare (Roma)
- Brindisi - Casale
- Trapani - Birgi
- Cagliari - Elmas
- Verona
- Genova

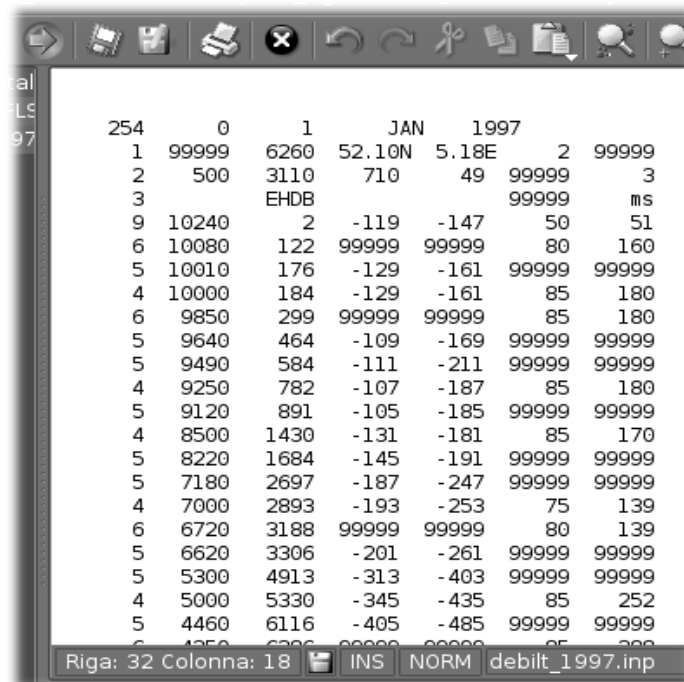
Esistono diversi siti internet dai quali poter ottenere i dati dei radiosondaggi, sotto forma sia di rilevazioni singole che di rappresentazioni grafiche degli andamenti di particolari parametri.

Per un'analisi più approfondita è invece necessario consultare database di gran lunga più completi e dettagliati.

A questo proposito si è scelto di far riferimento al RAOB (RAwinsonde Observation) della National Oceanographic and Atmospheric Administration (<http://raob.fsl.noaa.gov>)

Il database viene interrogato compilando un form nel quale si inseriscono le coordinate temporali e si sceglie il sito d'interesse.

Il file che viene prodotto è nel formato FSL, elaborato dal Forecast Systems Laboratory.



```

254      0      1      JAN      1997
1  99999  6260  52.10N  5.18E  2  99999
2    500  3110    710    49  99999  3
3                                99999  ms
9 10240    2   -119   -147    50    51
6 10080   122  99999  99999    80   160
5 10010   176  -129   -161  99999  99999
4 10000   184  -129   -161    85   180
6  9850   299  99999  99999    85   180
5  9640   464  -109   -169  99999  99999
5  9490   584  -111   -211  99999  99999
4  9250   782  -107   -187    85   180
5  9120   891  -105   -185  99999  99999
4  8500  1430  -131   -181    85   170
5  8220  1684  -145   -191  99999  99999
5  7180  2697  -187   -247  99999  99999
4  7000  2893  -193   -253    75   139
6  6720  3188  99999  99999    80   139
5  6620  3306  -201   -261  99999  99999
5  5300  4913  -313   -403  99999  99999
4  5000  5330  -345   -435    85   252
5  4460  6116  -405   -485  99999  99999

```

Fig.16 File FSL prodotto dal database RAOB

Per ogni rilevazione vengono indicate la data in formato UTC, le coordinate del sito di lancio ed il codice identificativo della stazione, i valori sulla superficie e a quote crescenti di: pressione, altitudine, temperatura, punto di rugiada, direzione del vento e velocità del vento. Sono presenti in commercio dei software in grado di tradurre attraverso grafici o estrapolazioni i dati contenenti dei file FSL, ma dato il loro notevole costo e il loro limitato campo di operatività, si è scritto un programma ad hoc. Studiando a fondo la struttura e utilizzando degli strumenti in linguaggio Java in grado di scomporla filtrarla e ricomporla, si è potuto lavorare su file contenenti solamente le rilevazioni comprese negli intervalli d'interesse. Il passo successivo è stato quello di scrivere un programma che calcolasse la velocità media e la distribuzione della frequenza di velocità del vento. Nella compilazione si è avuta molta cura nella scelta del formato del file di output, in modo da risultare di gran lunga più maneggevole rispetto ai file FSL.

## 3.2 Scelta siti



Fig.17 Localizzazione siti. Copyright Google.Maps

La scelta dei siti di simulazione è stata motivata dalla volontà di valutare alcune situazioni rappresentative del territorio italiano. Affiancando quindi una significativa dislocazione geografica al vincolo di una buona disponibilità di dati presenti nel database per un periodo di almeno 5 anni, si è analizzati i dati di Milano, Pratica di mare, Brindisi, Cagliari e Trapani. Nel dettaglio si possono riconoscere una zona tipicamente sfavorevole per le installazioni eoliche come la pianura padana e alcune regioni, come la Puglia, la Sicilia e la Sardegna, in cui sono presenti diversi impianti eolici.

Secondariamente si è considerato d'includere nello studio anche il sito olandese di De Bilt, in passato già utilizzato per valutazioni energetiche effettuate dal Professor Wubbo J. Ockels riguardo al progetto sperimentale della tecnologia eolica d'alta quota denominato Laddermill. [Ockels, W.J., 2004, "The Laddermill: work in progress", Submitted to: European Wind Energy Conference, London, 2004]



## 4 Intensità del vento

Lo studio della grande mole di dati ricavati dal database RAOB non può essere effettuato senza una strategia mirata al raggiungimento di risultati confrontabili e di determinato significato operativo. Nell'ottica di analizzare un sito e qualificarlo dal punto vista della ventosità disponibile, l'aspetto inizialmente più utile da valutare per un sistema eolico d'alta quota è l'andamento riferito all'altezza della velocità del vento. In seguito si calcolerà la frequenza di ogni singolo valore di velocità, con l'obiettivo di poter simulare con buona probabilità il campo di velocità a cui sarebbe soggetto il Kite Gen e una torre eolica tradizionale.

L'orizzonte temporale utilizzato per avere una buona rappresentazione della dispersione dei dati non è il medesimo per i 5 siti analizzati. Per ogni località preliminarmente si è eseguito un conteggio delle rilevazioni valide registrate mese per mese, in seguito si è selezionato il periodo significativo costituito soltanto da anni consecutivi e infine si è passati al calcolo vero e proprio.

Gli anni analizzati per Brindisi sono dal 1997 fino al 2006, per Cagliari, De Bilt e Pratica di mare dal 1997 al 2001, per Linate e Trapani dal 1998 al 2002.

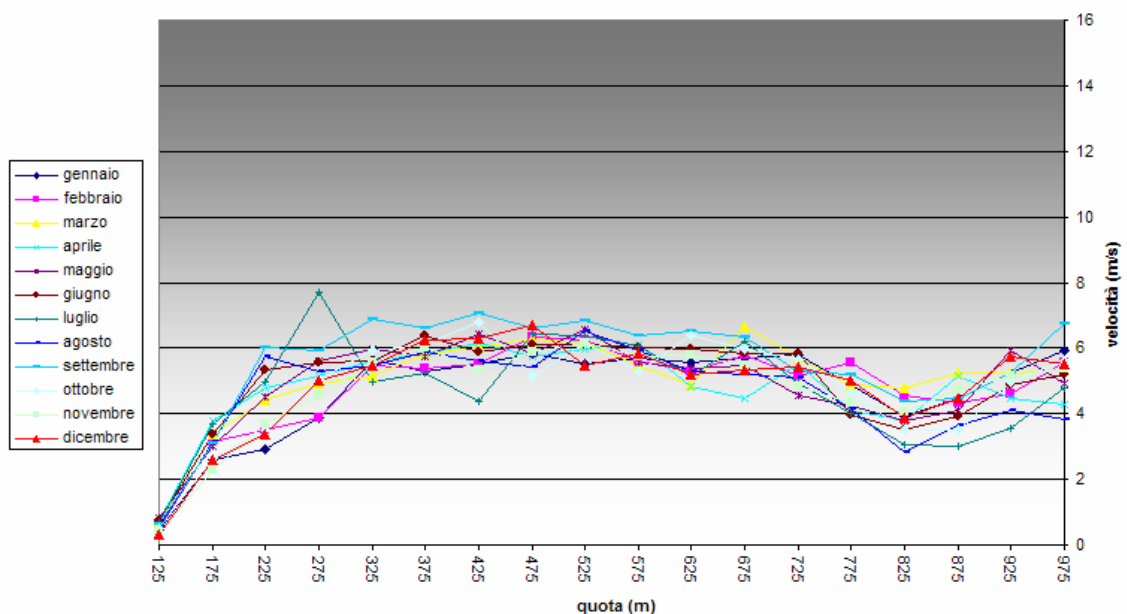
### 4.1 Velocità media

Lo studio della distribuzione della velocità del vento in funzione della quota viene effettuato restringendo il campo d'indagine in intervalli di 50 metri partendo da 100 fino ad arrivare a 1000 metri rispetto all'altitudine della stazione di sounding. Per ognuna di queste fasce di quota si calcola la velocità media rispetto al mese del periodo in esame, ottenendo in questo modo 12 andamenti per sito. Seguendo questa procedura è possibile visualizzare, per le installazioni ipotizzate, i range di quota caratterizzati da velocità del vento maggiore e i mesi dell'anno più "virtuosi", valutando anche una possibile variabilità stagionale.

Di seguito si procede con un'analisi distinta per ogni sito. Si riportano alcuni parametri indicativi dell'andamento, come la velocità massima media, l'intervallo di quota nel quale si è verificata, se esistono grandi differenze tra mesi diversi e se si può individuare una stretta dipendenza con l'alternarsi delle stagioni.

Al fine di aumentare la visibilità delle differenze tra i sei diversi siti si è utilizzata la stessa scala e per raffigurare gli andamenti dei dodici mesi si è fatto riferimento alla stessa legenda.

### Linate



*v media max: > 5 m/s*

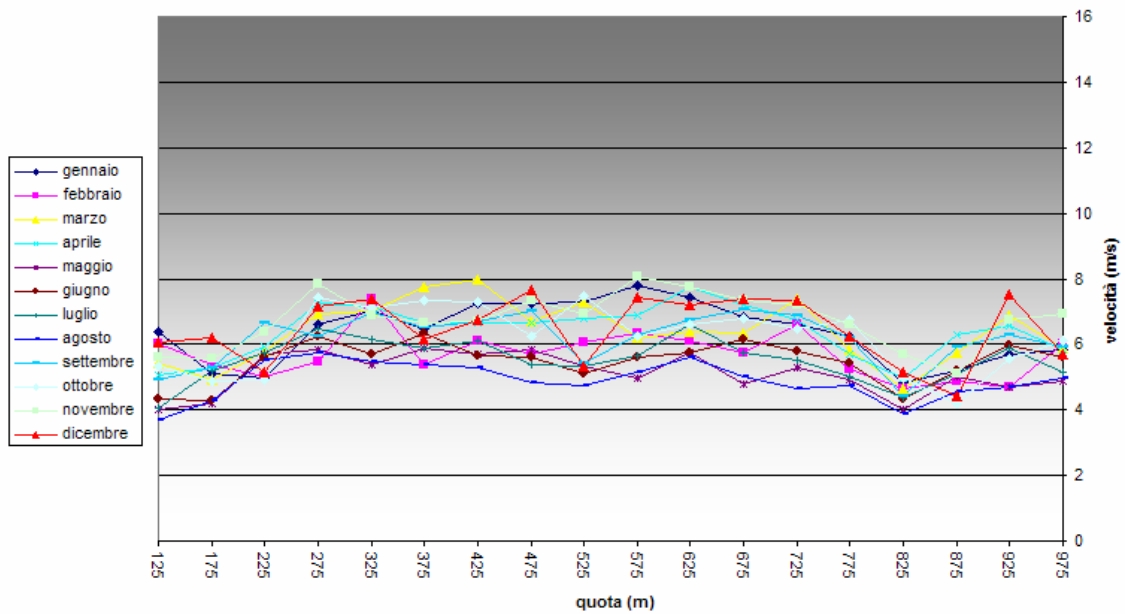
*quota v media max: tra 250 e 750 m*

*stagionalità: poco rilevante*

*note: scarsissima ventosità sotto i 150 metri, quasi indipendenza dal mese*

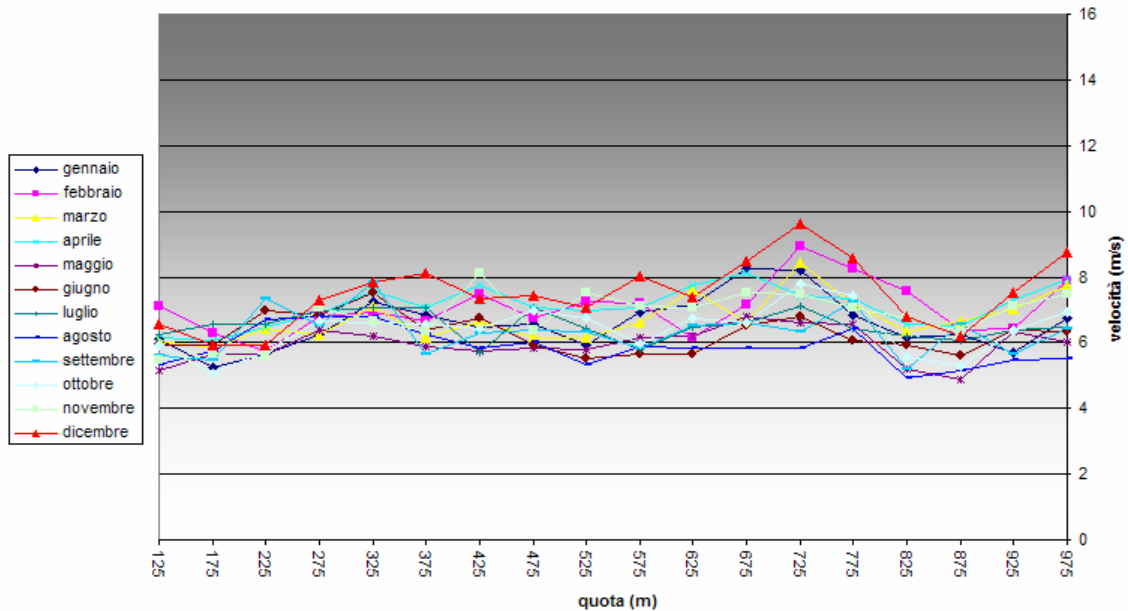


### Pratica di mare



*v media max: > 6 m/s*  
*quota v media max: tra 250 e 750 m*  
*stagionalità: media (variazione di 3 m/s)*  
*note: agosto mese meno ventoso*

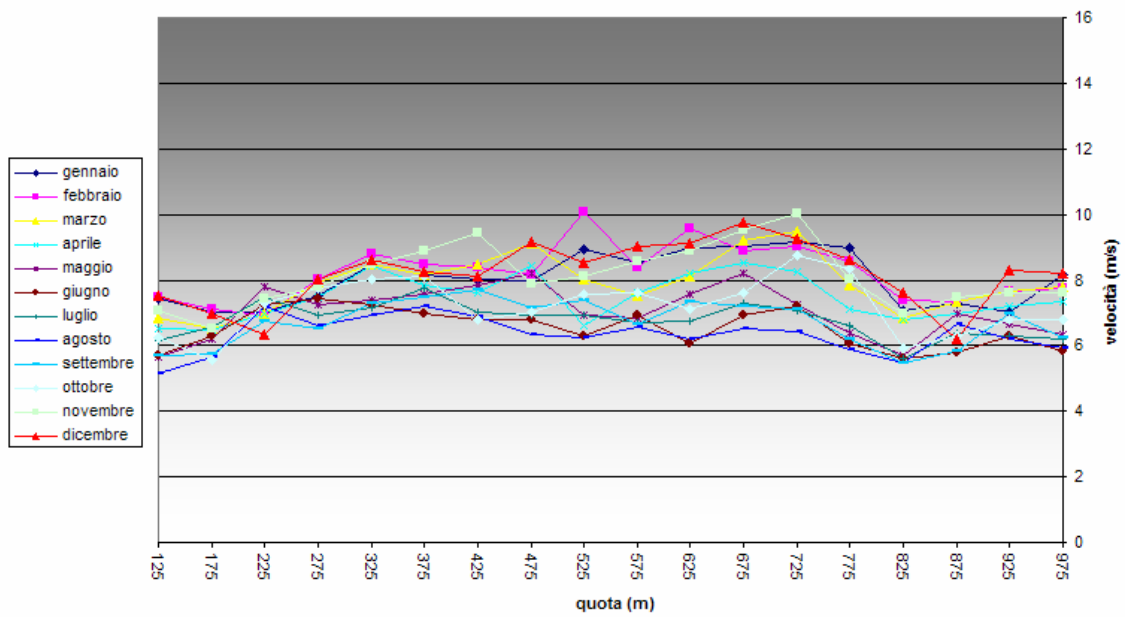
### Cagliari



*v media max: > 7 m/s*  
*quota v media max: tra 650 e 800 m*  
*stagionalità: poco rilevante (variazione minore di 2m/s)*  
*note: poca variabilità con la quota.*

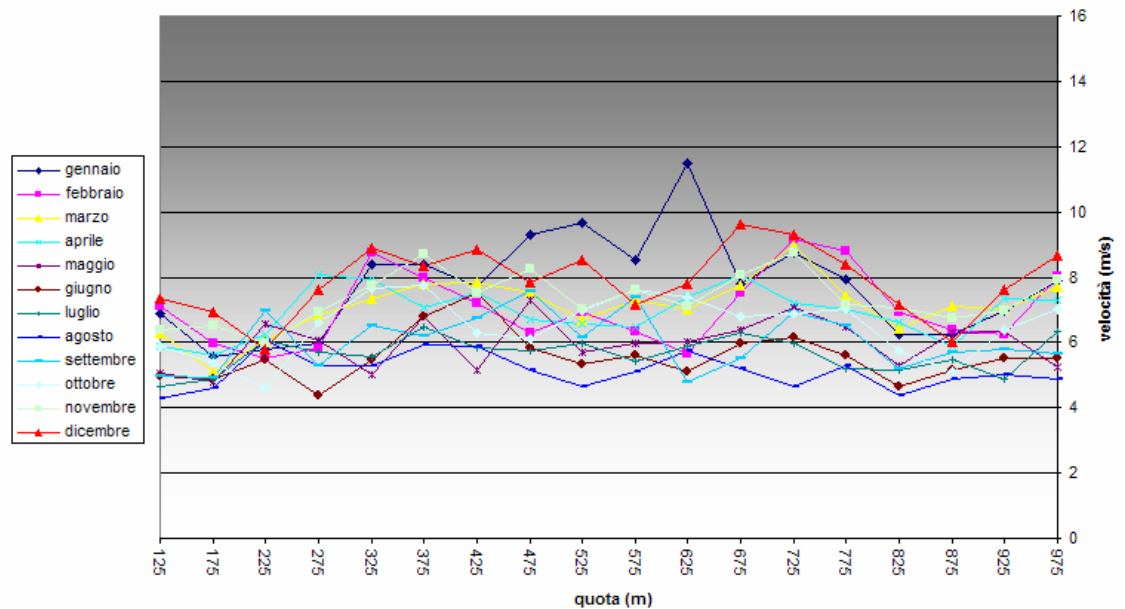


### Brindisi



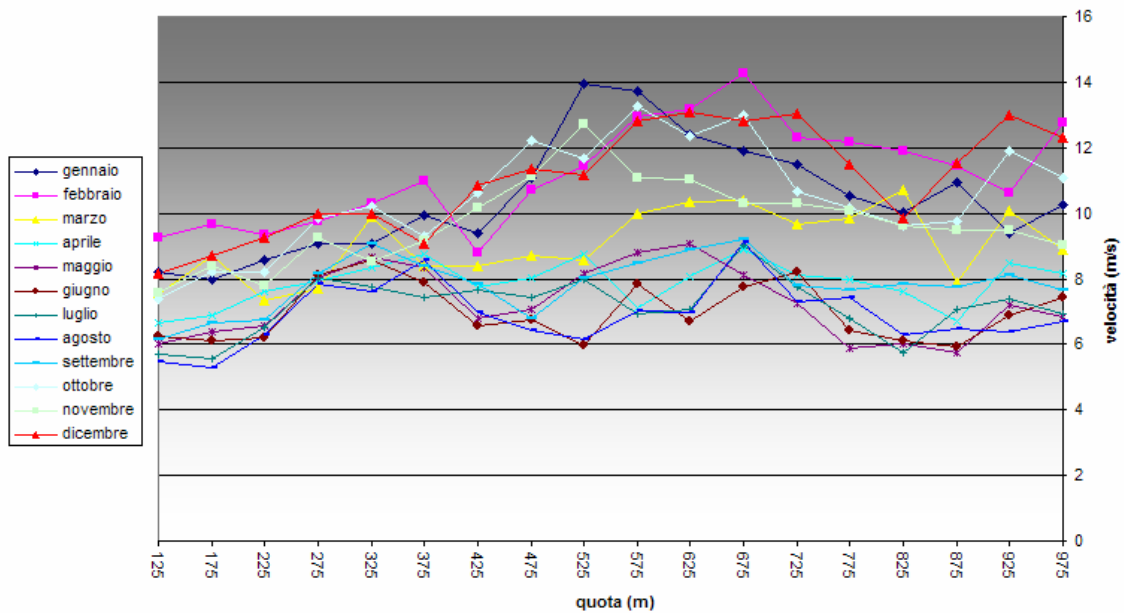
*v media max: 8 m/s*  
*quota v media max: tra 350 e 800 m*  
*stagionalità: mediamente marcata (variazione maggiore di 3 m/s)*  
*note: alta velocità minima (6 m/s)*

### Trapani



*v media max: > 7 m/s*  
*quota v media max: tra 300 e 800 m*  
*stagionalità: marcata (variazione di 4 m/s)*  
*note: picco di velocità a gennaio (11,5 m/s)*

## De Bilt



*v media max: 13 m/s*

*quota v media max: tra 450 e 750 m*

*stagionalità: molto marcata (variazione maggiore di 5 m/s)*

*note: tra l'estate (6 m/s) e l'inverno (13 m/s) c'è quasi raddoppio*

Complessivamente si è evidenziato:

- una discreta variabilità stagionale nei siti a poca ventosità, più marcata nel caso di siti a maggiore ventosità
- presenza di una zona compresa tra i 200 e gli 800 metri caratterizzata da valori alti, mediamente costanti, di velocità di vento
- i mesi estivi sono apparsi i meno ventosi e mediamente presentano velocità del vento non inferiore ai 5-6 m/s



## 4.2 Frequenza dell'intensità del vento

L'analisi qualitativa di un sito non può limitarsi al solo valore della velocità media, la ragione principale è che la generazione di energia da parte della macchina eolica è legata ad una curva di potenza, caratterizzata da un andamento essenzialmente cubico fino al raggiungimento della potenza nominale.

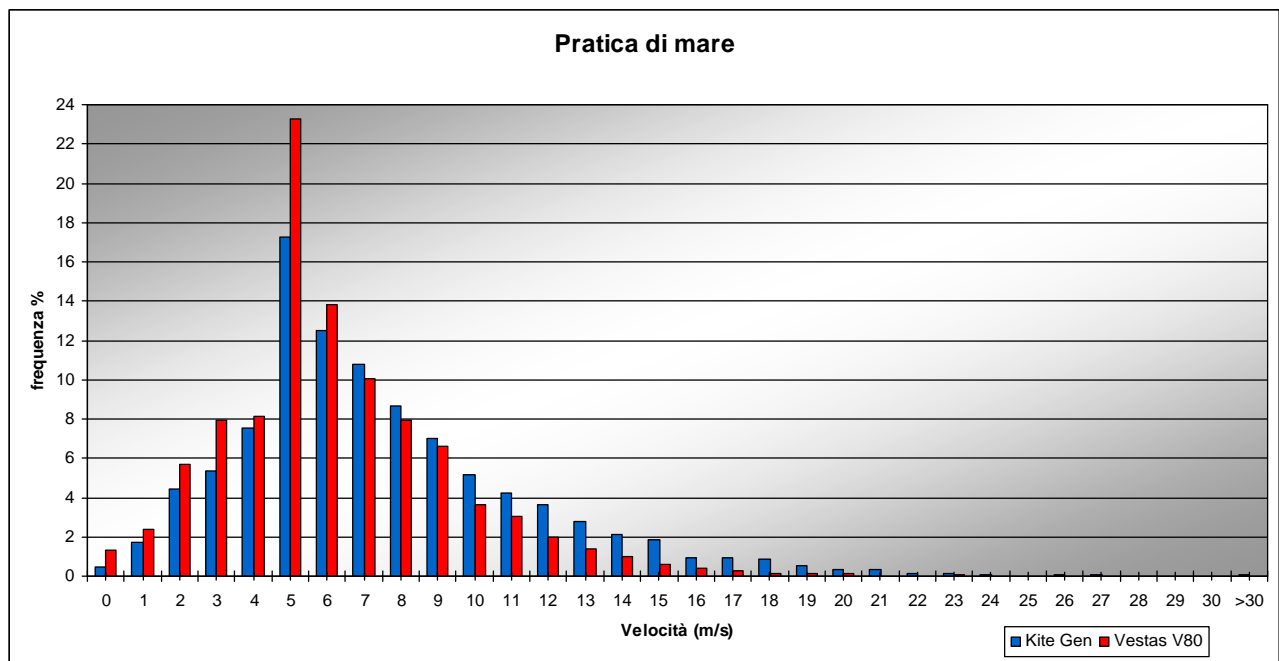
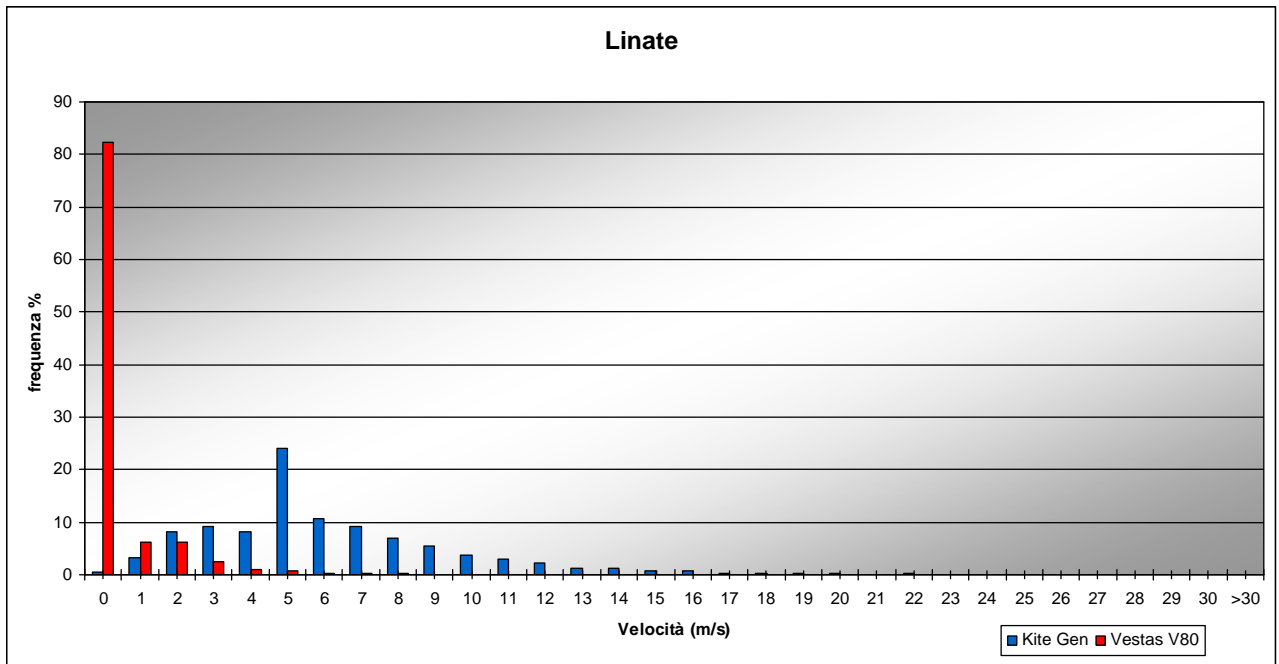
In termini più specifici e rigorosi occorre contabilizzare la frequenza di accadimento di ogni valore di velocità. Valutando infatti in un determinato periodo la probabilità che soffi vento di una particolare intensità si ha la determinazione precisa di come sia ripartita la produzione di energia ad opera di una macchina eolica.

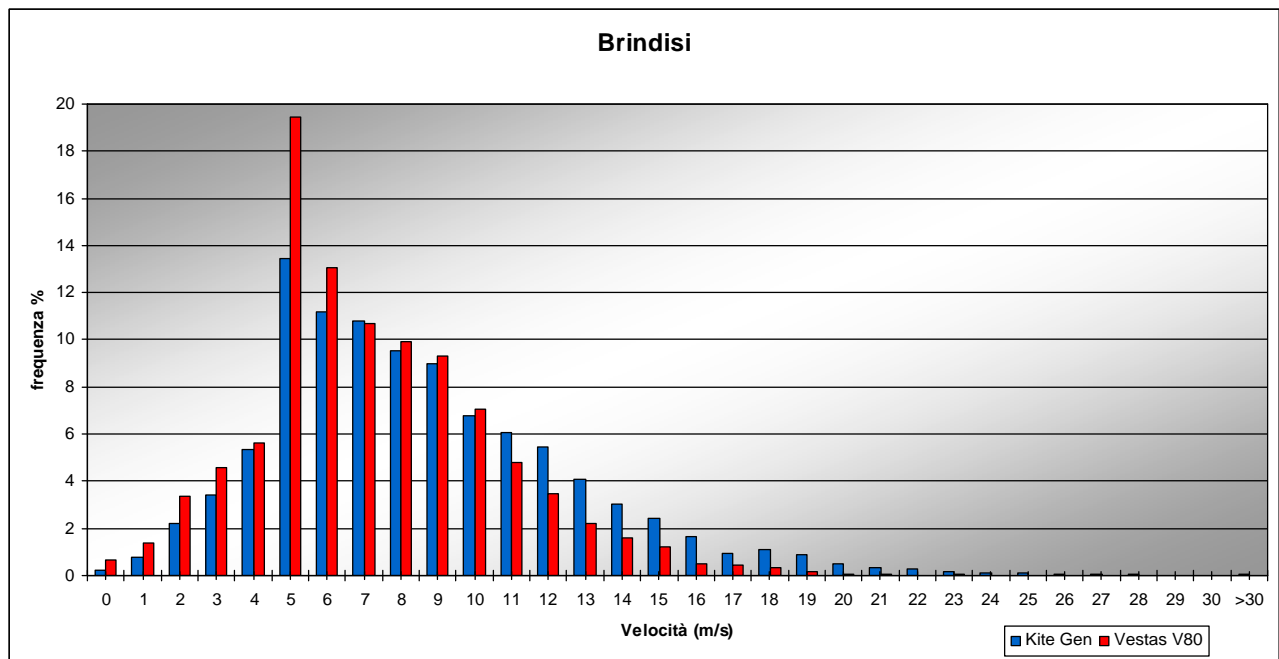
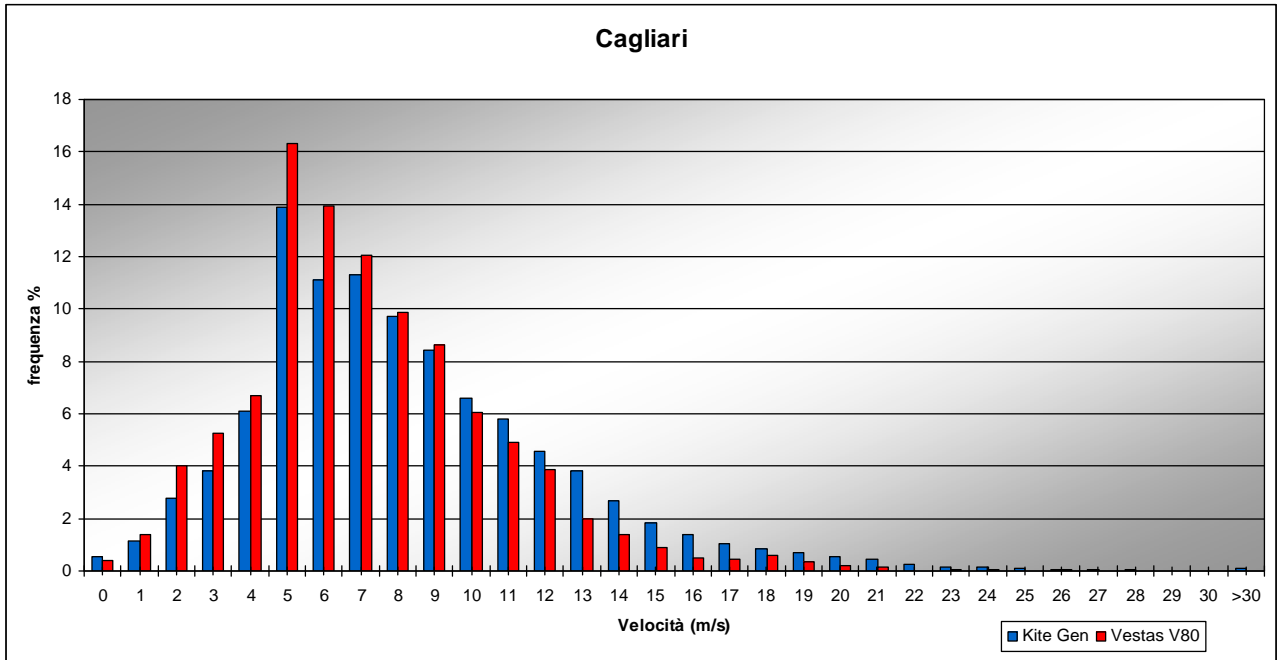
La presenza di una forte densità di dati permette di assicurare una rappresentazione molto dettagliata del periodo in analisi, difatti l'insieme delle rilevazioni forniscono una fotografia ben definita del campo di velocità. L'analisi dei dati viene effettuata selezionando le rilevazioni in base ai differenti intervalli di quota che costituiscono le aree spazzate dagli elementi mobili delle due tecnologie:

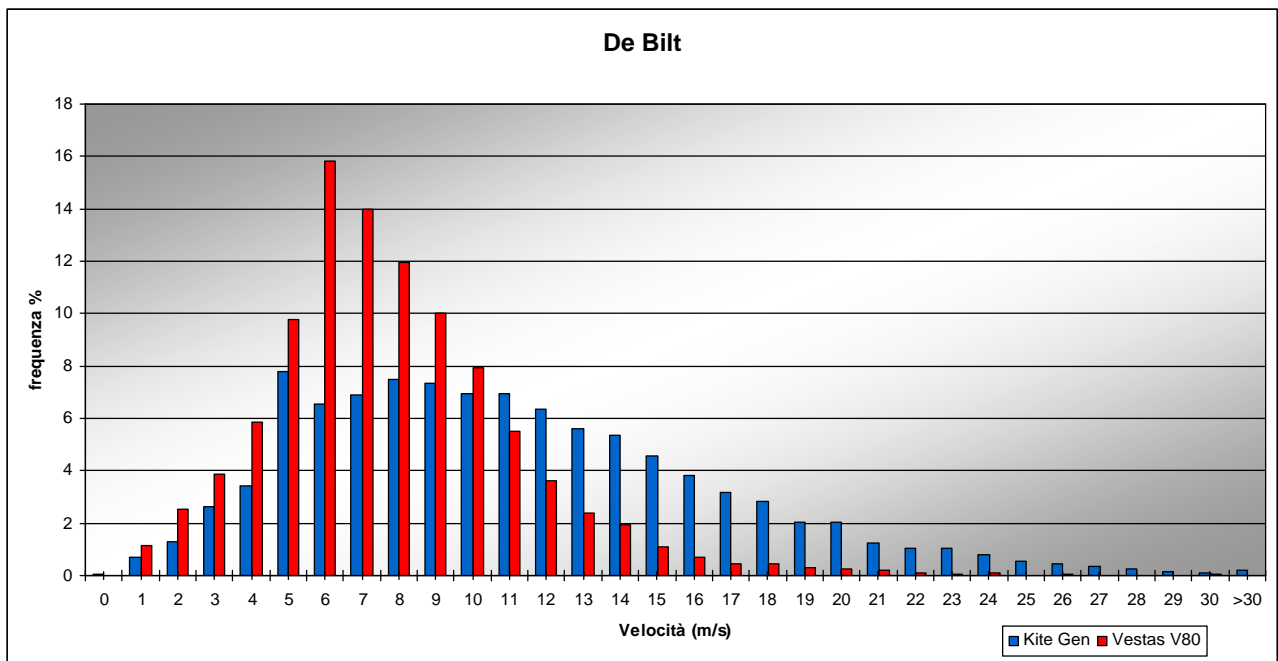
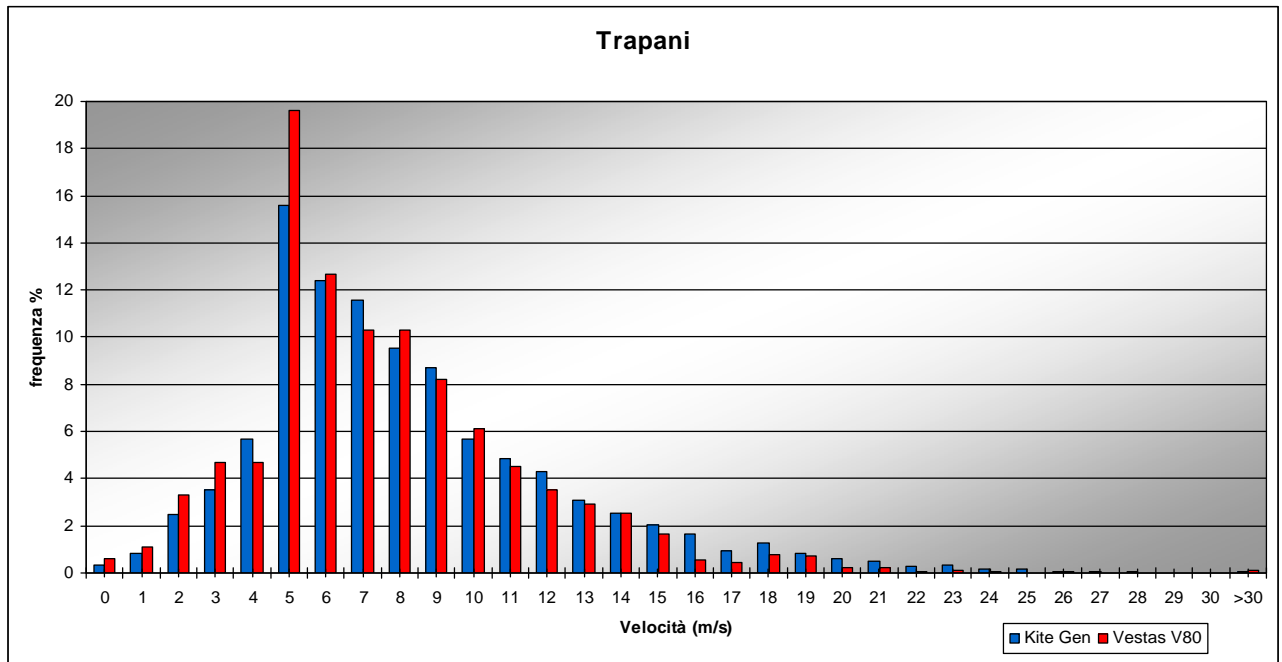
Vestas V80-2.0 (40-120 metri)

Kite Gen V9-2M (200-800 metri)

I risultati vengono rappresentati in istogrammi raffiguranti i valori di velocità e le frequenze di accadimento.







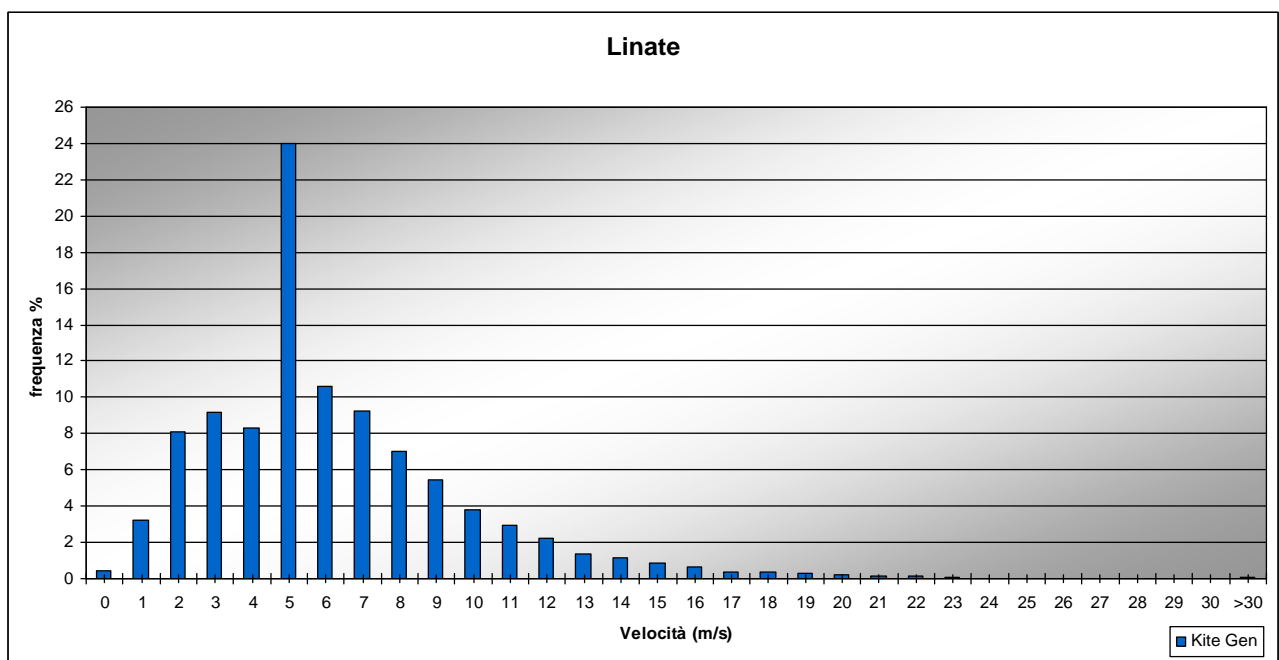


Ad una prima analisi si possono distinguere tre diverse categorie attraverso le quali è possibile classificare i siti.

Le quattro località costiere italiane presentano un andamento molto simile per i due aerogeneratori, caratterizzato da un valore più frequente di 5 m/s e da differenze di qualche metro al secondo sia alle piccole velocità, che nella coda di ventosità maggiore.

De Bilt registra un emblematico zero per quanto riguarda la probabilità che si verifichi bonaccia nel periodo considerato. Inoltre la velocità con maggiore frequenza di accadimento per le Vestas è 6 m/s, mentre la caratteristica per il Kite Gen si discosta molto marcatamente presentando una distribuzione più spostata verso le alte velocità, dove è possibile sviluppare più potenza.

Nel caso di Linate si ha una vera e propria differenziazione tra la turbina eolica e l'impianto a profili alari. Se da una parte i rotori delle Vestas rimarrebbero immobili per circa il 70% del tempo, il vento disponibile a un impianto Kite Gen sarebbe solo di poco inferiore a quello verificato negli altri siti costieri italiani. Da questo dato risulta evidente l'importanza dello sfruttamento dei venti d'altitudine. Precisamente, riportando l'istogramma ma utilizzando una scala confrontabile a quelle dei diagrammi precedenti, si può notare come la distribuzione di frequenza delle velocità alle quote di funzionamento del Kite Gen sia, persino a Linate, confrontabile a quelle dei siti notoriamente più ventosi.



## 5 Valutazioni energetiche

### 5.1 Availability

La stima delle ore di funzionamento equivalente può essere facilmente effettuata calcolando l'energia elettrica producibile complessivamente in un determinato sito e rapportarla alla potenza installata. L'energia generata, come indicato in precedenza, è dipendente dalla curva di potenza della tecnologia esaminata e dalla distribuzione oraria dell'intensità della velocità del vento.

Se si trasforma la frequenza di una determinata velocità in un tempo su base annuale attraverso la proporzione:

$$t(v) = [\% \text{ frequenza}(v) * 8760] / 100$$

si ottiene il numero di ore l'anno durante le quali si verifica quel preciso valore di velocità.

Si effettua quindi il prodotto tra il numero di ore e la potenza che a quella velocità l'aerogeneratore può sviluppare, si fa la sommatoria su tutti i possibili valori di velocità e si ricava la stima dell'energia prodotta annualmente.

$$E \text{ el. prodotta} = \sum [P(v) * t(v)]$$

A questo punto si inverte la formula della potenza e si ottengono le ore di funzionamento equivalente.

$$T \text{ eq} = E \text{ el. prodotta} / P \text{ installata} \quad [\text{ore} / \text{anno}]$$

Si riportano sinteticamente i risultati espressi in ore/anno:

	Linate	Pratica	Cagliari	Trapani	Brindisi	De Bilt
Vestas V80-2.0	71	1949	2711	2940	2741	3094
Kite Gen V9-2M	3122	4221	4954	4872	5227	6402

## 5.2 Fattore di utilizzazione

L'equivalente adimensionato dell'availability è il fattore di utilizzazione, esso si ottiene facendo il rapporto tra le ore di funzionamento a potenza nominale con il numero di ore annuali.

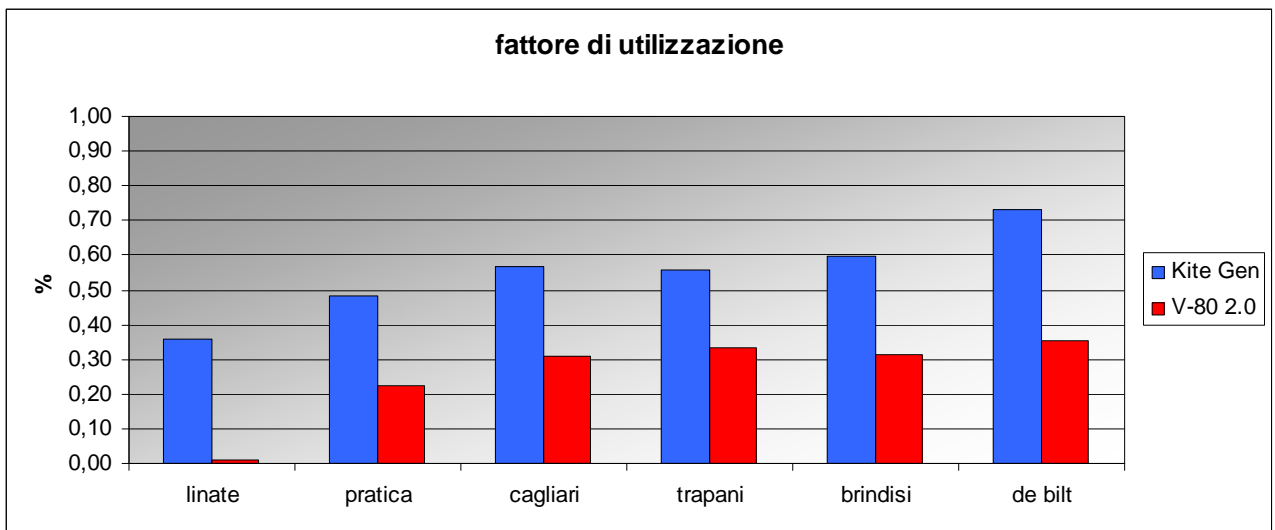
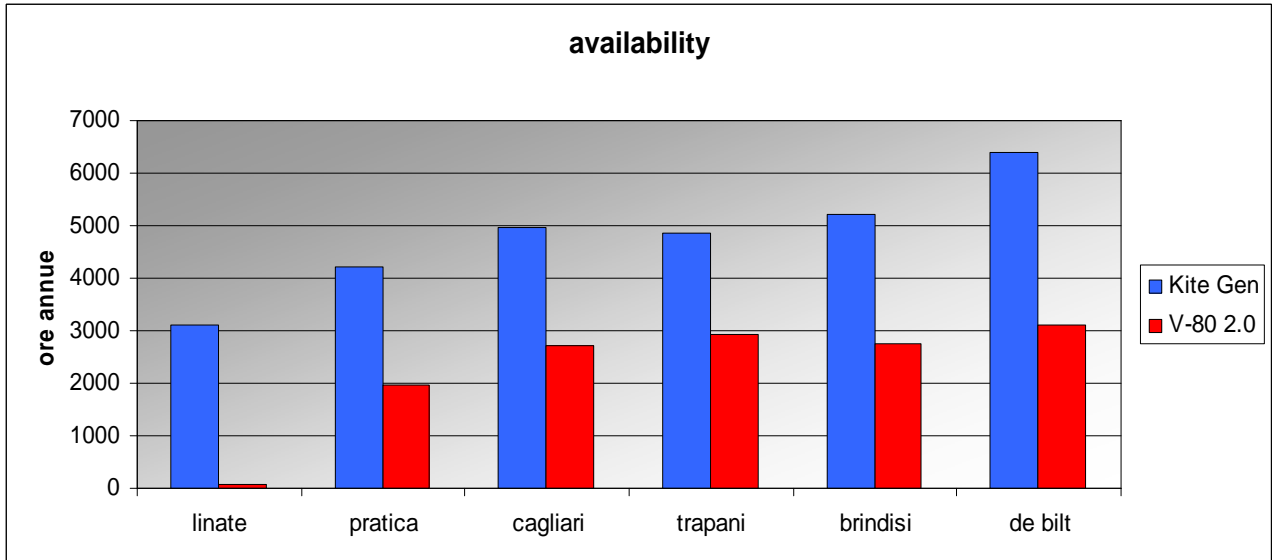
$$f.u. = T_{eq} / 8760$$

Si riportano i risultati sinteticamente:

	Linate	Pratica	Cagliari	Trapani	Brindisi	De Bilt
Vestas V80-2.0	0,01	0,22	0,31	0,34	0,31	0,35
Kite Gen V9-2M	0,36	0,48	0,57	0,56	0,60	0,73

### 5.3 Confronto

Per semplificare il confronto si rappresentano i risultati ottenuti in due istogrammi riassuntivi.



L'aspetto che risalta maggiormente è la capacità della tecnologia Kite Gen di riuscire a sfruttare la ventosità disponibile anche in siti completamente inadatti all'eolico tradizionale come Linate.

Più in generale i valori ottenuti dal Kite Gen in confronto alla turbina Vestas sono estremamente di rilievo. In media si passa da un minimo del 20% in più del fattore di utilizzazione a Trapani ad un massimo del 35% a Linate. Dal punto di vista del funzionamento l'incremento corrisponde a circa 2-3000 ore, ovvero dai 4 ai 6 GWh l'anno producibili in più con un singolo Kite Gen da 2 MW installato nella stesso sito di una turbina eolica.



# Conclusione

Nel corso di questa tesi si è affrontato uno studio di analisi energetica riguardo la tecnologia d'alta quota Kite Gen.

Il presente lavoro non ha la finalità di essere esaustivo, poiché si basa essenzialmente su rilevazioni anemometriche effettuate per studi climatici, ma vuole fornire, in un contesto di necessità di sviluppo delle fonti rinnovabili e in assenza di ricerche e statistiche dettagliate, un quadro sulle eccezionali potenzialità produttive di questa tecnologia, non tralasciando gli aspetti concettuali.

Si è cercato di trovare un compromesso fra la dimensione più prettamente strumentistica, aerodinamica e di controllo, e l'ambito di studio del corso di laurea energetica, inserendo il discorso in un contesto più illustrativo, limitando la descrizione alle caratteristiche e alle prestazioni della tecnologia Kite Gen.

Ci si è posto l'obiettivo di realizzare un lavoro rivolto a chi si occupa della valutazione e dello studio dell'utilizzo delle nuove tecnologie energetiche, per questo motivo si è riservata particolare attenzione ai risultati operativi stimati, piuttosto che al commento riguardo la progettazione dei componenti o i limiti strutturali, argomenti che necessitano tuttavia ulteriori approfondimenti.

La sfida maggiore è riguardata soprattutto la ricerca di uno strumento capace di maneggiare i dati prodotti dal database RAOB, riconoscerne il formato e velocizzare il calcolo. Pur esistendo in commercio software per la decodifica e l'analisi a scopo meteorologico, si è preferito scrivere un programma in linguaggio Java adatto alle proprie esigenze, in grado di acquisire grandi quantità di dati, selezionare i valori d'interesse ed estrarli in modo ordinato.

Le ipotesi adottate nella trattazione sono state essenzialmente dettate dall'esigenza di semplificare i calcoli e non dall'alterare i risultati. Si è infatti considerato il vento come monodirezionale e si è effettuata l'assunzione della velocità nominale del vento per il Kite Gen, motivandone la scelta attraverso la stima della curva di potenza. Si è confinata l'analisi solamente a cinque siti italiani e ad uno olandese, ma è stato un vincolo imposto dalla disponibilità di dati, necessariamente numerosi e costanti per almeno cinque anni consecutivi.



Tuttavia i risultati ottenuti presentano caratteristiche di estremo interesse. Un Kite Gen installato presso De Bilt, con un raggio di azione compreso tra gli 800 e i 200 metri di altitudine funzionerebbe per 6400 ore l'anno, availability tipica delle più performanti centrali a combustibile fossile. Ottimi riscontri si sono avuti anche con le simulazioni effettuate nei siti costieri italiani, con fattori di utilizzazione doppi rispetto ad un impianto eolico tradizionale. Sorprendente è il valore di availability di Linate, superiore al valore considerato il massimo raggiungibile da una turbina eolica installata in Italia. Si è così dimostrato che la tecnologia Kite Gen può rivoluzionare la definizione di sito ventoso, rendendo non solo possibile, ma anche altamente remunerativa, la generazione di energia elettrica da fonte eolica in una più ampia area geografica

La metodologia seguita ed i software compilati possono essere utilizzati con successo laddove ci sia l'interesse alla valutazione energetica e naturalmente dove siano disponibili i dati anemometrici. I ricercatori della Stanford University hanno effettuato una valutazione su scala mondiale dell'energia del vento convogliabile dalle turbine eoliche, quantificando una potenza disponibile a 80 metri d'altezza di circa 72 TW [Archer, C. L., and M. Z. Jacobson (2005), "*Evaluation of global wind power*", J. Geophys. Res., 110, D12110, doi:10.1029/2004JD005462]. Di notevole interesse sarebbe compiere la medesima valutazione alle quote di funzionamento del Kite Gen.

Conseguentemente alla realizzazione del prototipo sarà la misurazione della potenza sviluppata ai diversi valori del vento, al fine di approfondire l'effettivo andamento della curva di potenza.

Questi ed altri studi saranno necessari per comprendere quali siano gli intervalli di quota più convenienti tecnologicamente ed economicamente al fine di imbrigliare fronti di vento con una più favorevole distribuzione di velocità, in funzione della potenza da sviluppare.

In conclusione, si può davvero essere certi che il progetto Kite Gen abbia tutte le promesse per poter costituire una ecologica e vantaggiosa alternativa alle fonti non rinnovabili..



# Ringraziamenti

Approfitto di questo spazio per ringraziare i miei genitori per l'opportunità che mi hanno dato, mio fratello, la mia ragazza, i coinquilini e i gli amici per la loro presenza.

Ringrazio i miei relatori Mario Milanese ed Evasio Lavagno per aver creduto nelle mie capacità e sopportato i miei difetti.

Un grazie speciale a Enrico LoTauro (neongen@libero.it) per l'impegno e l'inestimabile contributo nella scrittura del software, Mario Càllisto (m.callisto@kitegen.com) e Cristina Archer (lozej@stanford.edu) per i consigli.



# Bibliografia

## Publicazioni

Archer C. L., M. Z. Jacobson (2005), *Evaluation of global wind power*, J. Geophys. Res., 110, D12110,

Canale M., Fagiano L., Ippolito M., Milanese M. (2006), *Control of tethered airfoils for a new class of wind energy generator*, 45th IEEE Conference on Decision and Control, December 13-15, 2006 - San Diego, CA, USA

Milanese M., *KiteGen project: control as key technology for a quantum leap in wind energy generators*, 2007 American Control Conference, July 11-13, 2007 - New York City, NY, USA

Ockels, W.J., 2004, *The Laddermill: work in progress*, Submitted to: European Wind Energy Conference, London, 2004

*State of the World 2004 'Consumi'*, 2004 - ISBN 88-89014-04-0 Worldwatch Institute

## Sitografia

<a href="http://www.kitegen.com">www.kitegen.com</a>	Progetto Kite Gen
<a href="http://www.europarl.europa.eu/">www.europarl.europa.eu/</a>	Parlamento europeo
<a href="http://nsidc.org/arcticmet/glossary/">nsidc.org/arcticmet/glossary/</a>	Glossario National Snow and Ice Data Center.
<a href="http://www.noaa.gov">www.noaa.gov</a>	National Oceanic and Atmospheric Administration
<a href="http://en.wikipedia.org">en.wikipedia.org</a>	Enciclopedia open source
<a href="http://www.maredinubi.it/">www.maredinubi.it/</a>	Metereologia
<a href="http://www.ren21.net">www.ren21.net</a>	Renewable Energy Network for the 21st Century
<a href="http://www.grtn.it">www.grtn.it</a>	Gestore dei Servizi Elettrici (GSE Spa)
<a href="http://www.awea.org">www.awea.org</a>	American Wind Energy Association
<a href="http://www.gwec.net/">www.gwec.net/</a>	Global Wind Energy Council
<a href="http://www.ewea.org/">www.ewea.org/</a>	European Wind Energy Association
<a href="http://www.iea.org/">www.iea.org/</a>	International Energy Agency
<a href="http://www.vestas.com">www.vestas.com</a>	Progettazione e installazione turbine eoliche
<a href="http://www.raob.com/data.htm">www.raob.com/data.htm</a>	Sorgenti dati radiosonde
<a href="http://raob.fsl.noaa.gov/">http://raob.fsl.noaa.gov/</a>	Archivio storico del Forecast Systems Laboratory