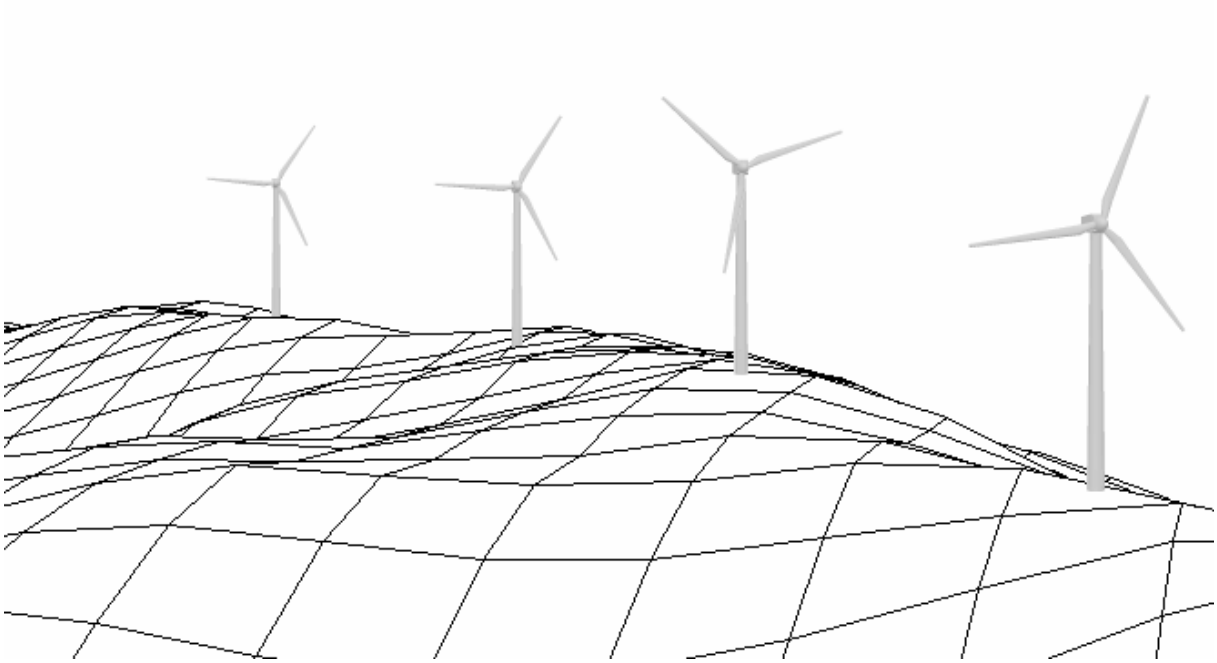
Fabbrica Energie Rinnovabili Alternative

PIAZZA CAVOUR, 7
20121 MILANO
TEL 02-62690471
FAX 02-32066804



PROGETTO DEFINITIVO

OGGETTO **_PARCO EOLICO "ROCCHE BIANCHE"_**

COMUNE	***QUILIANO, VADO LIGURE (SV)***
COMMITTENTE	**F.E.R.A. Srl**
RESPONSABILE	**Ing. C. Fera**
PROGETTISTA	**Ing. L. Pennisi**

TAVOLA	DESCRIZIONE
SPE	**STUDIO DEL POTENZIALE EOLICO**

DATA	**21/12/2009**
REVISIONE	**A**
FORMATO	**A4**
SCALA	**-**
DISEGNO	**QVL-SPE-A**

TIMBRO E FIRMA



INDICE

1. INTRODUZIONE 5

2. DESCRIZIONE DEL SITO 5

3. STUDIO DEL POTENZIALE EOLICO 5

3.1. DESCRIZIONE DELLE STAZIONI ANEMOMETRICHE 6

3.1.1. POSIZIONE DELLE STAZIONI DI MISURA 10

3.2. ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI DELLE MISURE 11

4. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA DEL SITO 16

5. CORRELAZIONI 18

6. LAYOUT E STIMA DELLA PRODUZIONE DEL PARCO EOLICO 20

6.1. RISULTATI DEL MODELLO WINDFARM 23

1. INTRODUZIONE

Il presente documento ha per oggetto la valutazione del potenziale eolico del sito, posto nel comune di Quiliano (SV), Regione Liguria.

Il Parco Eolico sarà costituito da una singola sezione di impianto, costituita da 4 aerogeneratori posti in località *"Cima delle Rocche Bianche"*. Nel complesso, l'impianto sarà in grado di generare un massimo di 8 MW.

Nel presente studio vengono illustrati i risultati della valutazione della risorsa eolica e della stima della produzione di energia per il posizionamento definitivo degli aerogeneratori.

2. DESCRIZIONE DEL SITO

Il sito ha conformazione collinare, dal profilo marcato. L'area interessata dall'impianto proposto si sviluppa lungo il crinale della Cima delle Rocche Bianche, per una lunghezza di circa 950 m ad una quota compresa tra 520 e 560 m s.l.m, il Layout è stato ottimizzato in base a considerazioni orografiche ed anemologiche (secondo la rosa del vento) che caratterizzano il sito.

3. STUDIO DEL POTENZIALE EOLICO

La zona dove è previsto il parco eolico oggetto del presente documento è stata caratterizzata dal punto di vista anemologico, tramite un'attenta e prolungata campagna di misura per determinare con accuratezza:

- velocità media del vento;
- direzione predominante del vento;
- producibilità energetica dell'impianto;
- posizionamento definitivo degli aerogeneratori.

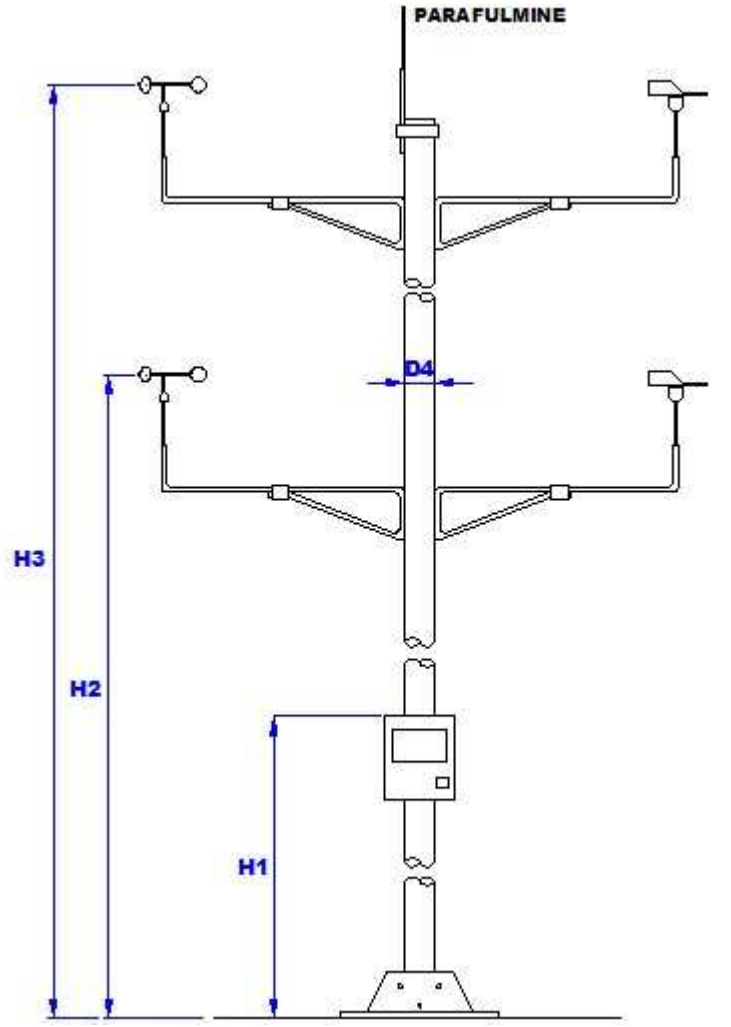
L'analisi anemometrica è stata condotta facendo riferimento a due serie di dati; entrambe le serie derivanti da campagne anemometriche condotte mediante stazioni anemometriche da 40m situate in prossimità del sito di progetto. Il posizionamento delle due stazioni anemometriche, è ottimale ai fini della stima della producibilità dell'intero impianto.

L'acquisizione dei dati, mediante stazione anemometrica da 40m (0702), è stata avviata ad Agosto 2002 ed è terminata a Gennaio 2004, mentre le campagne di misura della stazione anemometrica (0703) è stata avviata ad Agosto 2002 ed è terminata a Gennaio 2003. Le stazioni sono state collocate in posizione idonea per poter predire ed estendere le misurazioni effettuate all'intera area di progetto, mediante l'utilizzo di software avanzati che consentono l'elaborazione fluidodinamica, a partire dalla conoscenza dell'orografia del sito, inoltre le procedure di correlazione tra le due stazioni hanno consentito di verificare la correttezza e la coerenza dei calcoli previsionali eseguiti mediante software.

3.1. DESCRIZIONE DELLE STAZIONI ANEMOMETRICHE

Per tutte le campagne di misura, sono stati impiegati logger per acquisizione dati della NRG 9200 Plus, su torri da 40 m di altezza dal suolo, attrezzate con due differenti quote di misura per la determinazione della velocità e della direzione. Gli schemi strutturali degli apparati anemometrici sono riportati in Figura 1.

La disposizione dei sensori è in totale rispetto della specifica IEC 61400, la quale stabilisce che la distanza minima dei sensori dai relativi supporti non debba essere inferiore a 7 volte il diametro del supporto stesso, al fine di ridurre al minimo la distorsione del flusso ventoso ad opera dei supporti stessi.



Misura	[m]
H1	2
H2	20
H3	40
D4	0.203

.

Figura 1- Schema Strutturale degli apparati di misura

Il campionamento dei dati avviene una volta ogni due secondi (0.5 Hz), con elaborazione dei dati e registrazione ad intervalli selezionati dall'utente. L'intervallo di registrazione sulle stazioni F.E.R.A. è stato impostato su 10 minuti, su tale intervallo di tempo sono calcolati i relativi valori medi.

I dati registrati dal logger per ogni canale di misura sono i seguenti:

- velocità media (m/s)
- direzione media (gradi rispetto al N magnetico)
- deviazione standard della velocità.

Gli strumenti usati per le misure hanno le seguenti caratteristiche:

	**NRG Maximum 40** • Accuracy: 0.1 m/s • Range: 1-96 m/s
	**NRG 200P** • Accuracy: <1% • Range: 0-360°



Figura 2 - Sensori a 40m



Figura 3 - Sensori a 20m

I dati registrati si immagazzinano su supporto di memoria EEPROM da 32kb di capacità. L'uso di memorie di tipo non volatile permette la protezione dei dati immagazzinati e dei parametri operativi a fronte di scariche elettriche o di mancanze di alimentazione dell'apparecchiatura.

I dati immagazzinati vengono passati ad un rigoroso controllo di qualità per essere depurati da possibili errori, o effetti di icing[1] che possono presentarsi durante periodi invernali particolarmente rigidi, prima di essere impiegati nella stima del potenziale eolico dell'area.

[1] Fenomeno particolarmente frequente durante le stagioni invernali e particolarmente fredde; consiste nella formazione di ghiaccio sulle parti meccaniche dei sensori, che ne comportano il bloccaggio o cattivo funzionamento.

3.1.1. POSIZIONE DELLE STAZIONI DI MISURA

Gli anemometri menzionati nel presente report sono stati collocati nelle posizioni di seguito indicate su carta tecnica regionale:

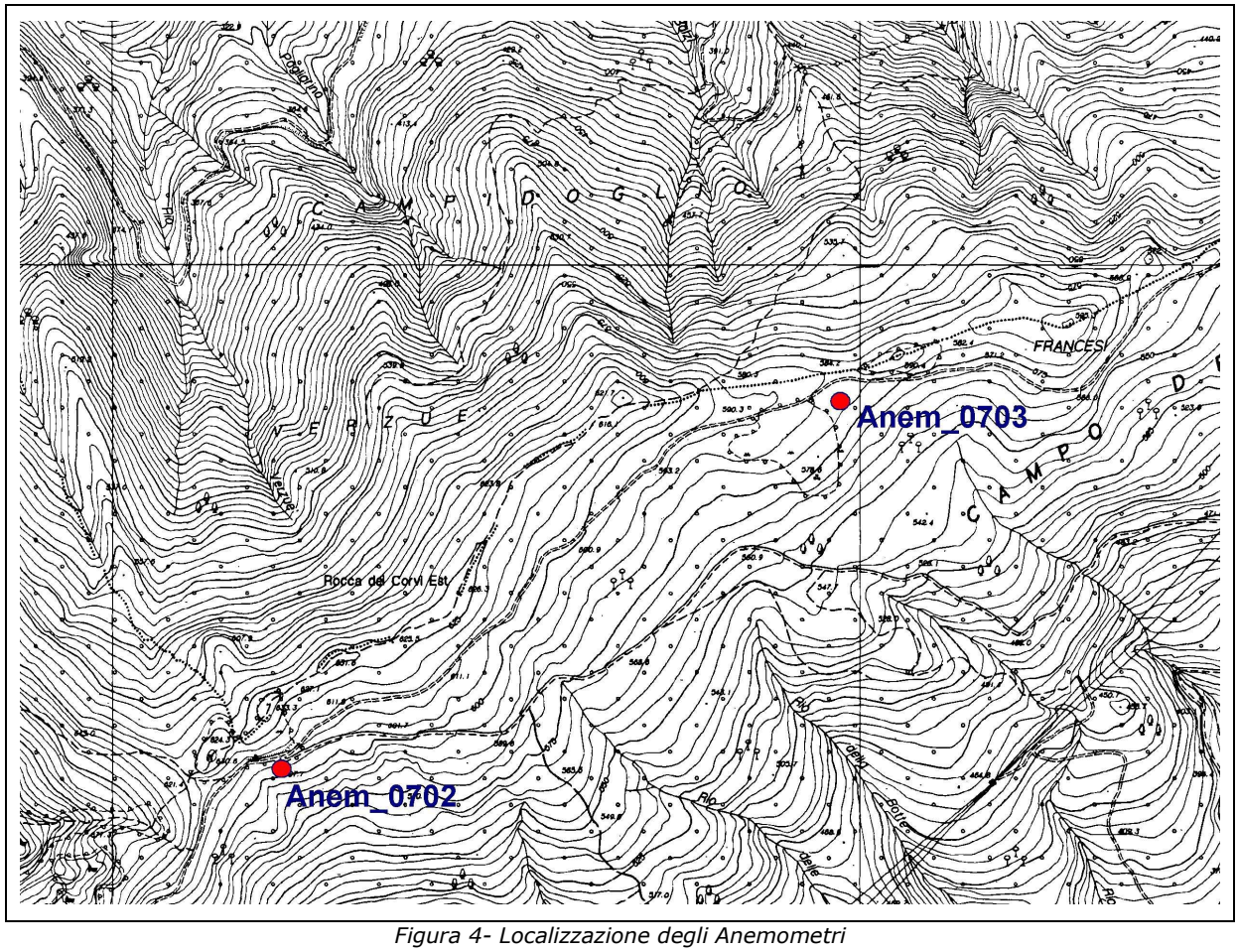


Figura 4- Localizzazione degli Anemometri

Denominazione Elemento	Geografiche	
	Lat	Long
Anem_0702	44° 15' 42.1"	8° 21' 46.9"
Anem_0703	44° 15' 57.6"	8° 22' 20.0"

Tabella 1- Coordinate Anemometri



Figura 5 - Posizione degli anemometri (Vista Satellitare)

3.2. ELABORAZIONE DEI DATI E RISULTATI DELLE MISURE

Si dispone di una copertura di dati anemometrici di circa 17 mesi per quanto riguarda l'anemometro 0702, circa 5 mesi per l'anemometro 0703; per l'analisi vera e propria saranno considerati i dati di entrambi gli anemometri, tuttavia sarà data maggiore enfasi ai dati corrispondenti alla campagna di misura più prolungata (0702).

Usufruendo della sufficiente disponibilità di dati anemometrici a quota 40m, è stato possibile eseguire un'analisi sufficientemente accurata in grado di fornire informazioni sulla potenzialità eolica del sito in oggetto; nella tabella seguente vi è riportata la copertura dei dati, la velocità media, e la deviazione standard, suddivise per mensilità, alle maggiori quote di misura di tutti gli anemometri i cui dati saranno utilizzati nel prosieguo.

Year	Month	Poss.Rec	Val.Rec	Recovery	Mean	SD
2002	Aug	4,464	4,051	90.7%	4.71	3.33
2002	Sep	4,320	4,320	100.0%	5.98	3.79
2002	Oct	4,464	4,464	100.0%	5.00	3.91
2002	Nov	4,320	4,320	100.0%	7.35	4.76
2002	Dec	4,464	4,434	99.3%	9.21	5.06
2003	Jan	4,464	4,464	100.0%	8.53	5.75
2003	Feb	4,032	4,032	100.0%	10.56	4.40
2003	Mar	4,464	4,464	100.0%	5.41	3.96
2003	Apr	4,320	4,320	100.0%	6.80	5.03
2003	May	4,464	2,951	66.1%	5.29	3.52
2003	Jun	4,320	4,320	100.0%	3.21	2.44
2003	Jul	4,464	4,464	100.0%	4.47	3.29
2003	Aug	4,464	4,464	100.0%	4.13	3.07
2003	Sep	4,320	3,578	82.8%	6.26	4.03
2003	Oct	4,464	4,464	100.0%	8.26	6.08
2003	Nov	4,320	4,320	100.0%	8.91	4.90
2003	Dec	4,464	4,076	91.3%	9.90	4.83
All data		74,592	71,506	95.9%	6.71	4.87
Mean of monthly means					**6.56**	

Tabella 2 - Velocità Medie Mensili - Sensore a 40m – Anemometro 0702

Year	Month	Poss.Rec	Val.Rec	Recovery	Mean	SD
2002	Aug	4,464	3,918	87.8%	5.13	3.80
2002	Sep	4,320	4,320	100.0%	6.73	4.66
2002	Oct	4,464	4,464	100.0%	5.33	4.40
2002	Nov	4,320	3,104	71.9%	8.53	5.92
2002	Dec	4,464	3,189	71.4%	6.95	5.20
All data		22,032	18,995	86.2%	6.40	4.91
Mean of monthly means					**6.52**	

Tabella 3 - Velocità Medie Mensili - Sensore a 40m – Anemometro 0703

Tutti i dati disponibili sono stati accuratamente filtrati e ripuliti da eventuali anomalie, dovute sia a malfunzionamenti ed avarie dell'apparato di misura, sia a fenomeni dovuti alle condizioni ambientali (icing); solo i dati ritenuti attendibili sono stati utilizzati nel calcolo dei valori medi.

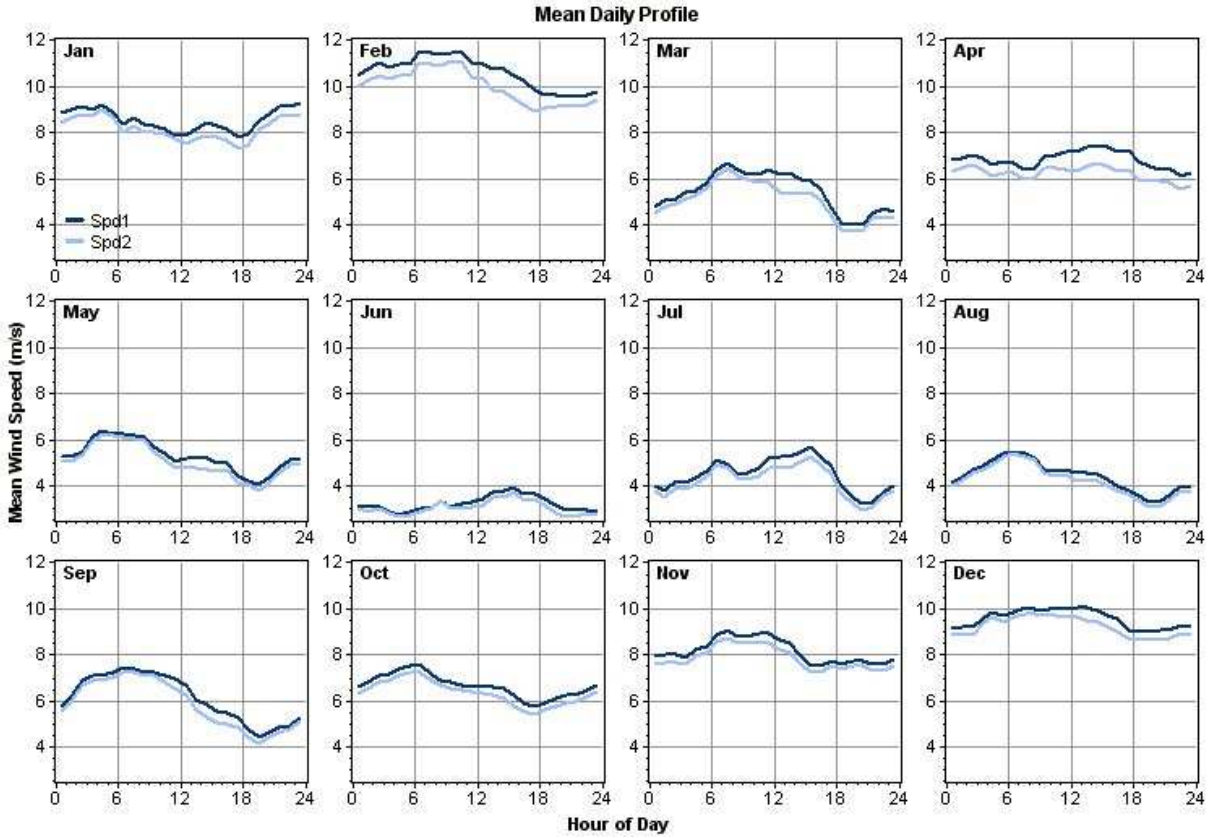


Figura 6 - Velocità Medie Orarie – Anemometro 0702 (40m e 20m)

Dalla precedente figura si può notare come l'andamento del profilo delle velocità medie giornaliere sia stagionale, in particolare caratterizzato da velocità sostenute durante la stagione invernale, e più modeste durante quella estiva, inoltre presenta una maggiore variabilità durante le stagioni estive, soprattutto a causa degli effetti termici dovuti alla radiazione solare. Nella figura di lato, è riportato l'andamento mensile dei valori medi di velocità alle quote 40m e 20m registrati mediante l'anemometro 0702.

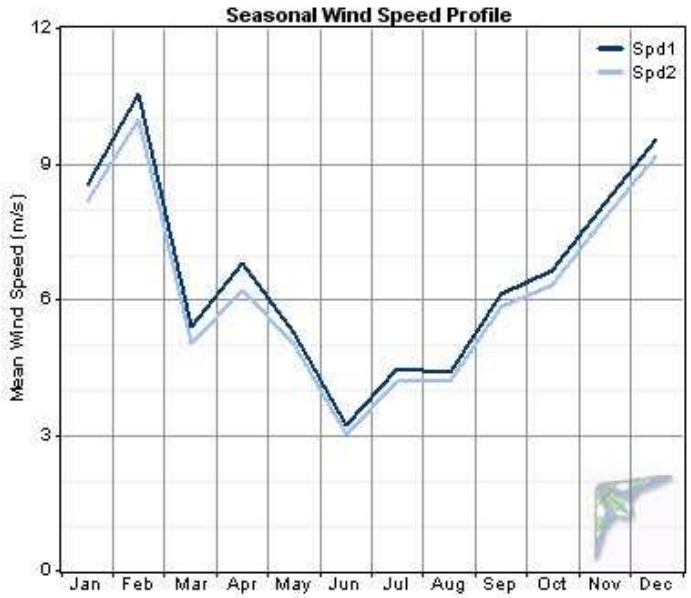


Figura 7 - Velocità medie mensili (0702)

La rosa del vento consente di avere una visione chiara di quali siano le direzioni prevalenti, sia in termini di frequenza, sia in termini di valori medi della velocità. Tramite questa informazione è possibile identificare la conformazione ottimale dell'impianto eolico (Layout), e la distanza tra gli aerogeneratori. Nelle Figure seguenti si riportano le rose del vento relative alla velocità misurata alla maggiore quota da entrambe le stazioni anemometriche.

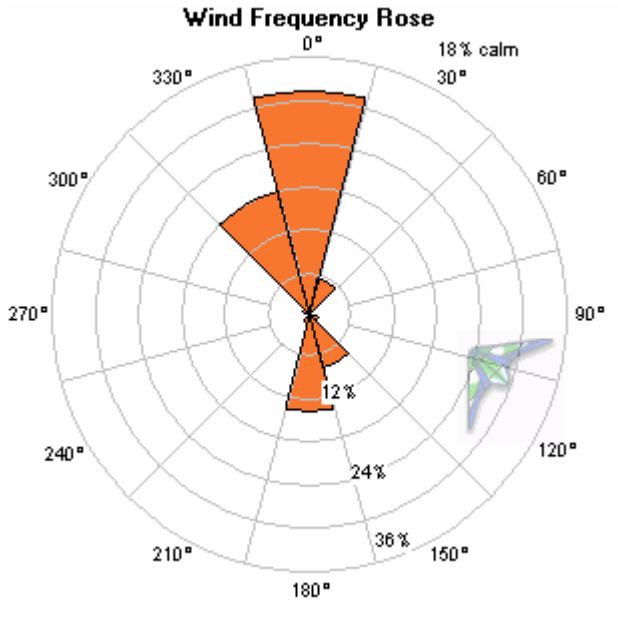


Figura 8 - Wind Rose Sensore 40m (0702)

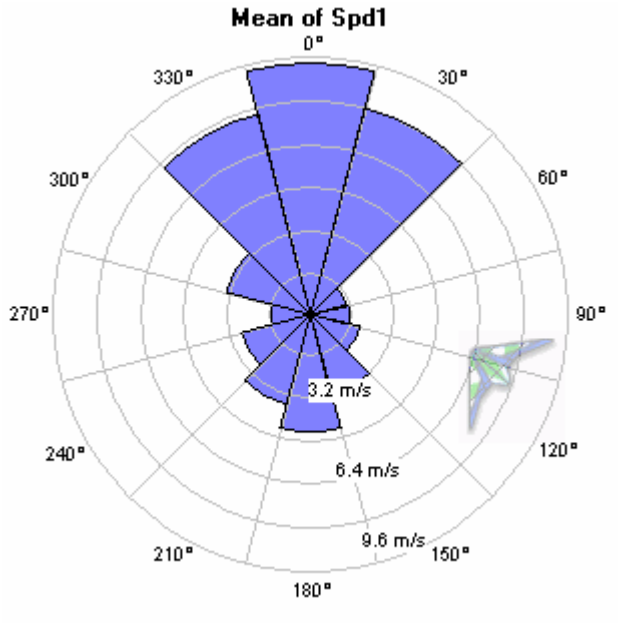


Figura 9 – Medie Direzionali 40m (0702)

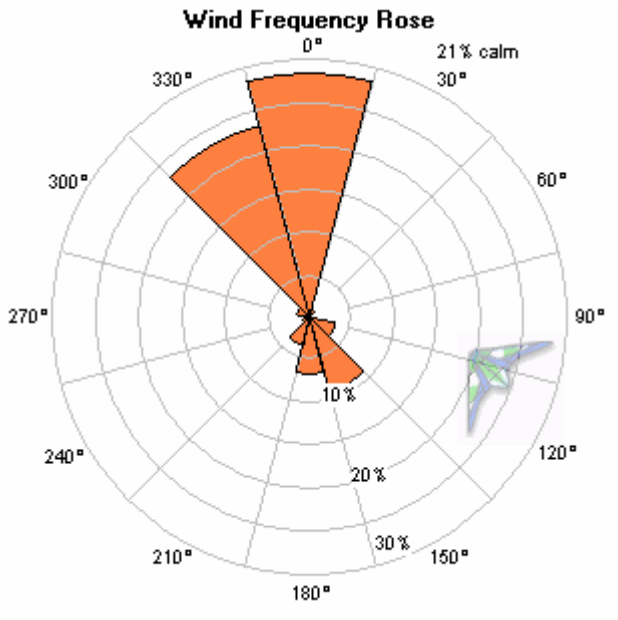


Figura 10 - - Wind Rose Sensore 40m (0703)

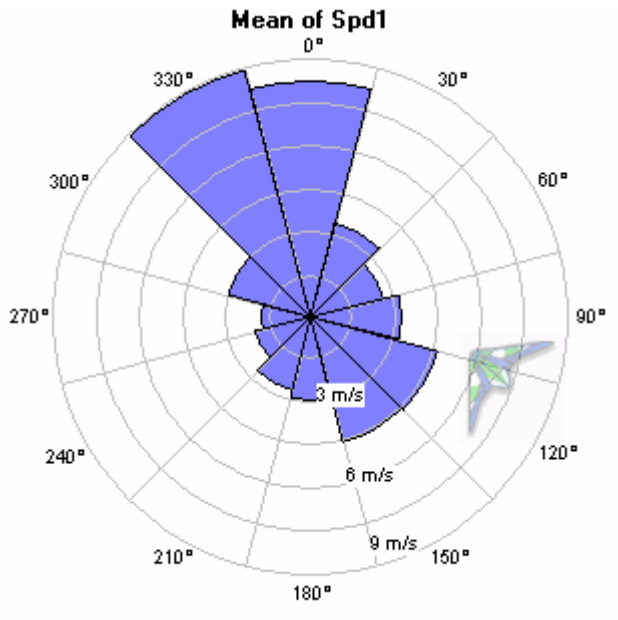


Figura 11 - Medie Direzionali 40m (0703)

Dalle quali si evince che la direzione prevalente, sotto il profilo della frequenza con cui si manifesta, sia la Tramontana. Di seguito si riportano le varie distribuzioni in frequenza dei due siti anemometrici, con riferimento ai dati misurati dal sensore posto a maggiore quota, la distribuzione per quanto concerne l'anemometro 0702 può ritenersi rappresentativa del sito grazie alla sufficiente copertura di dati (si evince la spiccata natura "bi-Weibull" del sito); mentre quella relativa allo 0703 non può essere considerata tale a causa della scarsa copertura di dati anemometrici.

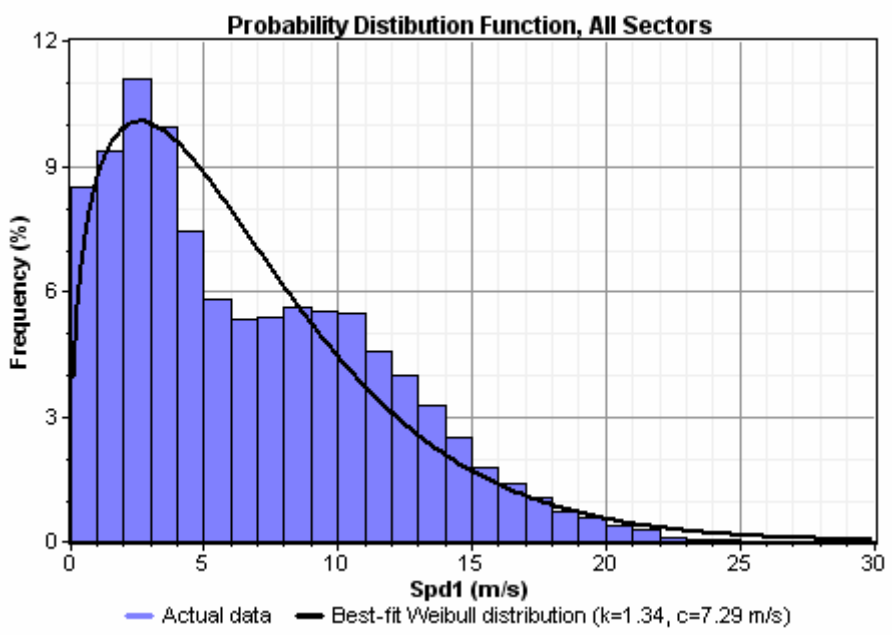


Figura 12 - Distribuzione di Weibull 0702 (40m)

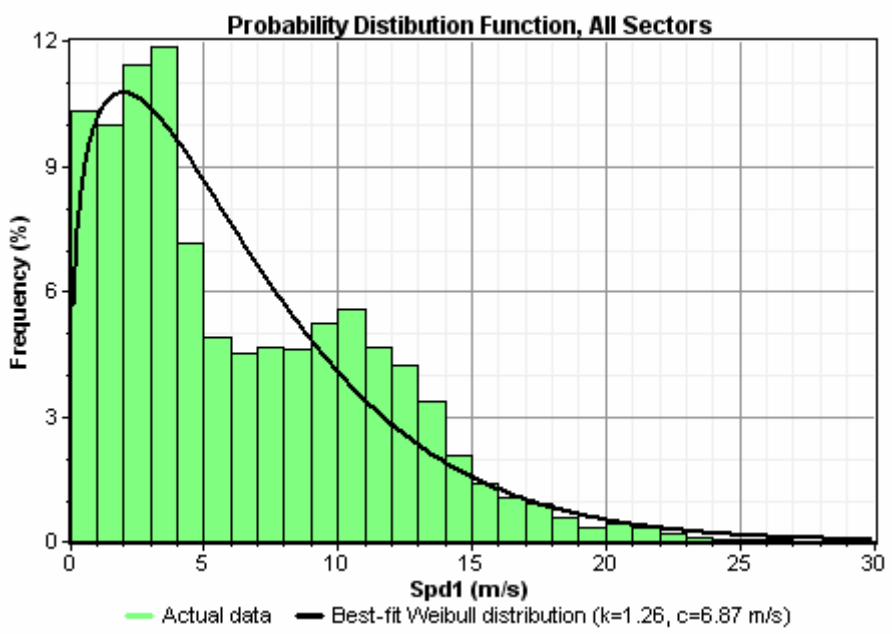
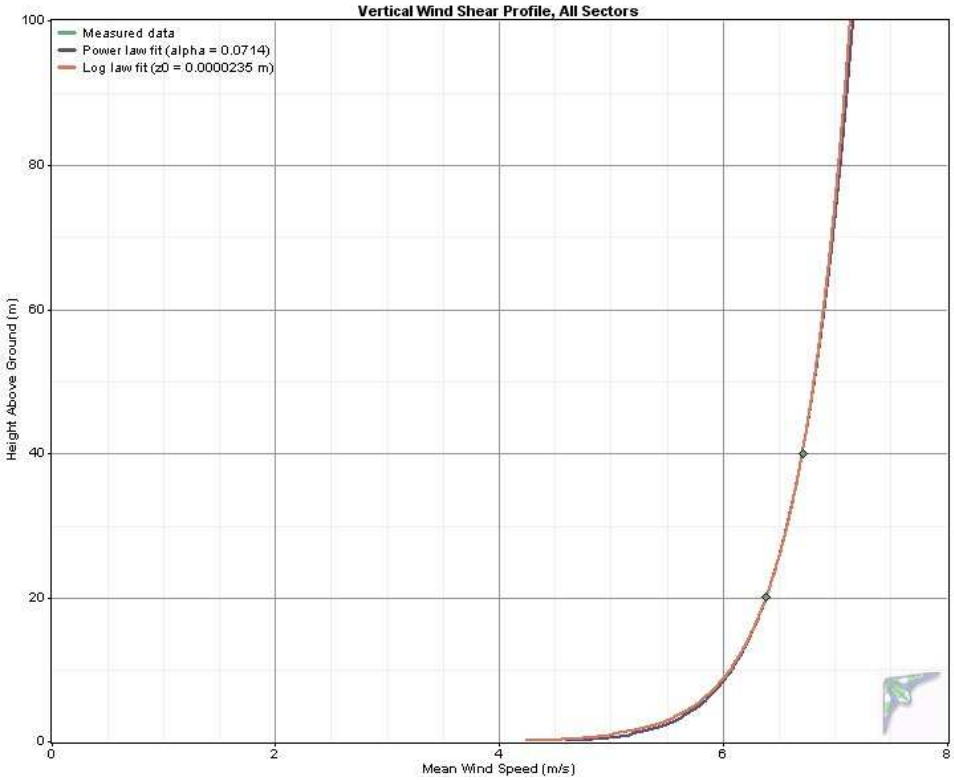


Figura 13 - Distribuzione di Weibull 0703 (40m)

4. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA DEL SITO

Un parametro estremamente importante per la valutazione della producibilità ed in generale della ventosità di un sito è certamente la rugosità (Roughness); tale parametro caratterizza il gradiente con cui varia la velocità media al variare della quota rispetto al suolo. La rugosità può essere espressa facendo ricorso a due differenti profili: il profilo logaritmico (per il quale è sufficiente indicare il parametro Z_0) e quello esponenziale (per il quale è sufficiente fornire l'esponente α). Fenomeni di speed-up[2] particolarmente accentuati nella zona in cui sono presenti gli anemometri, fanno si che il profilo verticale (Windshear) sia ripido (valori bassi di rugosità), come evidenziato nella seguente figura:

[2] Fenomeni di accelerazione localizzata dei flussi ventosi, in direzione trasversale rispetto al crinale



$$Z_0 = 0.0000235m$$
$$\alpha = 0.0714$$

Figura 14 - Prifilo verticale Anem. 0702

Il profilo verticale riportato nella Figura 14 è relativo a tutta la serie storica acquisita mediante anemometro 0702; estrapolando a quote superiore a quella di misurazione, sia con profilo logaritmico, sia con profilo esponenziale, si nota come i valori della velocità media subiscano delle lievi variazioni al rialzo, questo giustificherà la scelta di macchine con quota mozzo relativamente contenuta.

Tramite un'estrapolazione, sfruttando il profilo verticale, è possibile valutare il valore della velocità media a quota mozzo (ai fini dell'analisi anemometrica si è scelta una quota di riferimento pari a 80m s.l.t.); in funzione dei dati acquisiti fin'ora, e con riferimento al profilo logaritmico, si ha:

$$Vmean(80m) = 7.03\frac{m}{s} \qquad (0702)$$

5. CORRELAZIONI

La relativa vicinanza delle stazioni anemometriche, rispetto al parco eolico, consente di sviluppare modelli di calcolo sufficientemente accurati da consentire un buona stima della risorsa eolica; tuttavia per migliorare il processo computazionale, sono state eseguite delle correlazioni tra i dati anemometrici della stazione 0702 e quelli dell'anemometro 0703, in modo da valutare la stagionalità della ventosità e la coerenza dei valori misurati. Tali correlazioni consistono nella determinazione del coefficiente di slope, ovvero il coefficiente angolare della retta di regressione tra i dati dei due anemometri, in dipendenza del settore direzionale[3]. Le correlazioni sono state eseguite con tutti i dati e per ciascun sensore, al fine di verificare la corrispondenza tra i valori medi (annui e mensili) e la verosimiglianza dei risultati ottenuti dall'analisi della ventosità del sito eseguita mediante simulazioni. I risultati hanno confermato una buona correlabilità (bontà superiore al 74% sulle medie nei 10 minuti, su tutti i settori) tra gli anemometri posti a maggiore quota. Di seguito sono riportate alcune tabelle e figure riepilogative della procedura di correlazione.

[3] Normalmente la rosa è suddivisa in 12 settori da 30° ciascuno.

Reference 0702 40m Target 0703 40m				Record
Dir Range		**K**	**R^2**	**N**
-15	15	1.094	0.729	5,795
15	45	1.105	0.683	755
45	75	1.458	0.575	219
75	105	1.333	0.684	302
105	135	1.166	0.78	629
135	165	1.003	0.899	2,040
165	195	0.885	0.934	3,065
195	225	0.832	0.705	379
225	255	0.867	0.619	117
255	285	1.057	0.354	130
285	315	1.078	0.637	445
315	345	1.069	0.864	5,034
TOT			**0.744**	

Tabella 4 - Correlazione tra Anemometro 0702 (40m) e 0703 (40m)

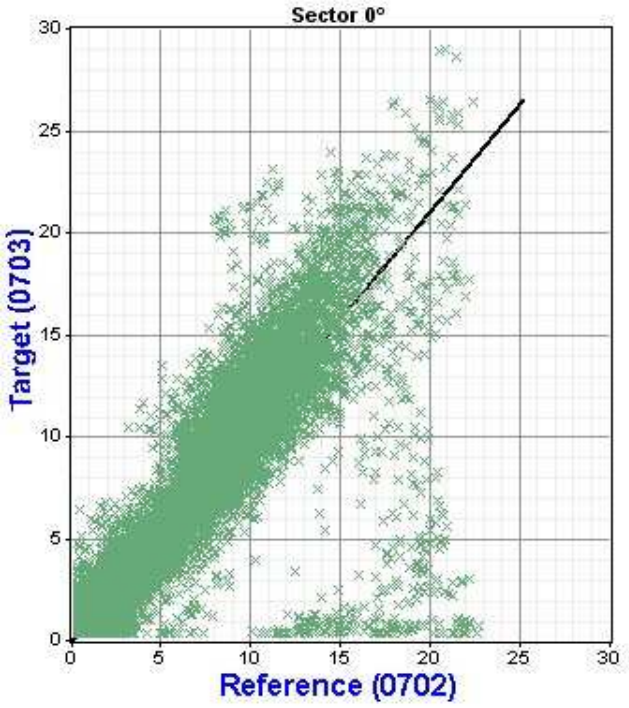


Figura 15 - Correlazione tra le velocità

Il parametro indicato con R^2 rappresenta la "*bontà di correlazione*" tra i dati; il valore complessivo di circa il 74% (ed in alcuni casi superiore) dimostra la buona correlabilità tra i valori medi misurati nei due siti, soprattutto per quanto concerne i settori direzionali di maggior frequenza.

6. LAYOUT E STIMA DELLA PRODUZIONE DEL PARCO EOLICO

La stima della risorsa eolica complessiva disponibile nella zona di studio, e della resa energetica della wind farm, richiede una modellazione spaziale del campo di vento. Questa modellazione permette l'estrapolazione orizzontale e verticale delle misure di vento disponibile nei siti previsti per il posizionamento degli aerogeneratori, e del vento all'altezza della navicella.

Gli applicativi informatici utilizzati per la valutazione del potenziale eolico sono:

- WINDOGRAPHER (versione 1.23), sviluppato dalla Mistaya Engineering Inc.
- WINDFARM (versione 4.0.1.3), sviluppato dalla ReSoft, Regno Unito.

Windographer consente l'elaborazione ed il filtraggio dell'intero database dei dati anemometrici disponibili, mentre WindFarm comprende il codice sorgente per il calcolo della distribuzione del vento MS-Micro/3, sviluppato nella versione DOS originale dagli scienziati del Meteorological Service of Canada and Zephyr North. WindFarm elabora le equazioni linearizzate del flusso del vento in terreni complessi per estrapolare i dati meteorologici acquisiti in un punto su un'area definita.

La distribuzione del vento nel sito, permette di calcolare la produzione del parco eolico, tenendo conto dell'influenza orografica e degli effetti di scia che i vari aerogeneratori producono reciprocamente.

Il Layout considerato per il sito in oggetto è quello indicato in Figura 16 (Sviluppo Complessivo) ed in Figura 17 (Dettaglio su CTR); nelle successive figure il layout è sovrapposto alla relativa mappa del vento elaborata mediante i software WindFarm.



Figura 16 - LAYOUT Complessivo: vista satellitare e 3D

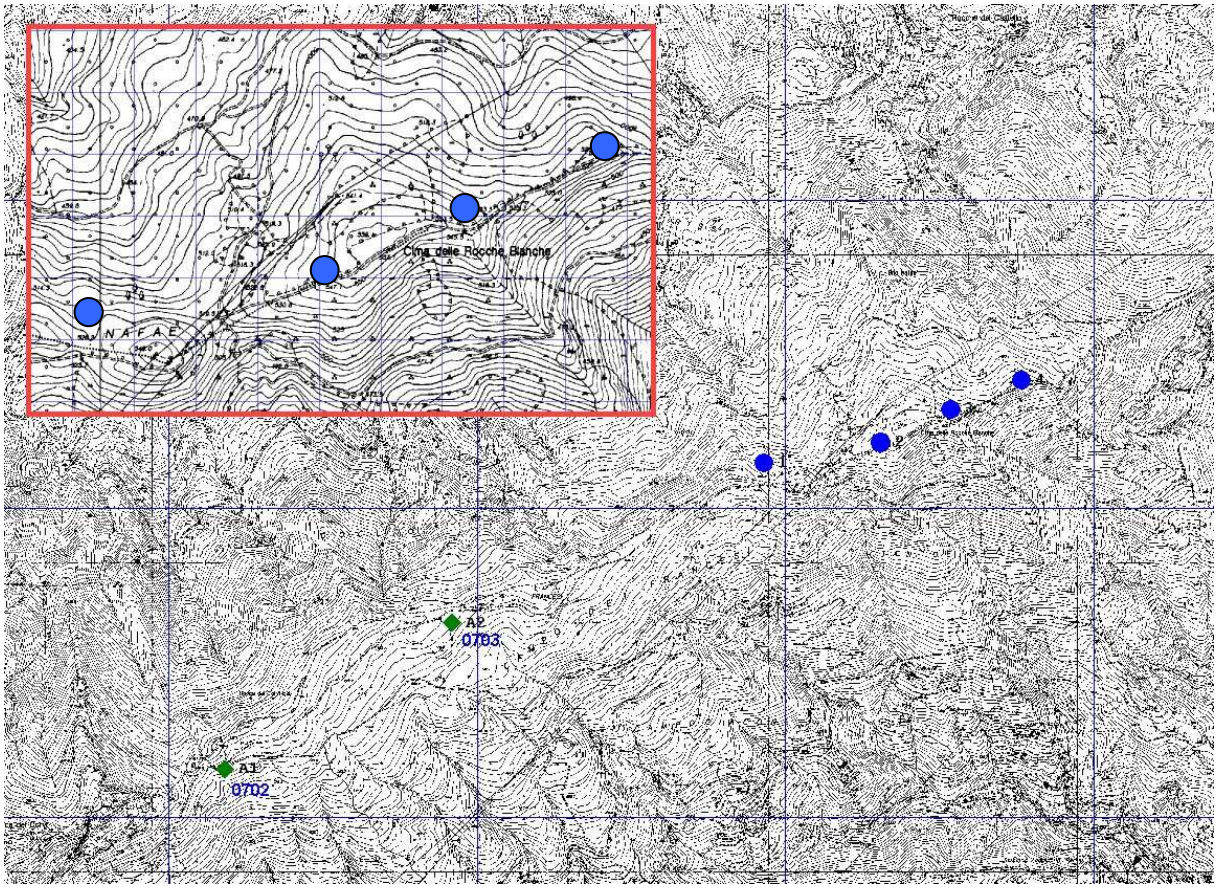


Figura 17 – Layout su CTR

Le coordinate di ciascuna torre sono di seguito riportate:

Denominazione Elemento	Geografiche	
	Lat	Long
AG01	44° 16'14"	08° 23' 07"
AG02	44° 16' 17"	08° 23' 22"
AG03	44° 16' 20"	08° 23' 32"
AG04	44° 16' 23"	08° 23' 43"

Tabella 5 - Coordinate degli Aerogeneratori

La serie temporale relativa all'anemometro 0702, è stata riadattata su base annua dal 01/09/02 al 31/08/03, al fine di tenere in considerazione la stagionalità della ventosità del sito.

Sfruttando tali informazioni sulla ventosità, si perviene alla determinazione della mappatura del vento di tutta l'area interessata dall'impianto. Mediante la conoscenza di quest'ultima, ed avendo a disposizione la curva di potenza relativa all'aerogeneratore selezionato per l'analaisi (vedi Figura 19), è possibile determinare la producibilità di ciascuna macchina e quindi la resa complessiva dell'impianto; si riportano, di seguito, i risultati ottenuti dal modello WindFarm.

6.1. RISULTATI DEL MODELLO WINDFARM

Di seguito si riporta la mappa iso-vento dell'area di impianto, la quale rappresenta distribuzione delle velocità medie annue a quota mozzo (80m).

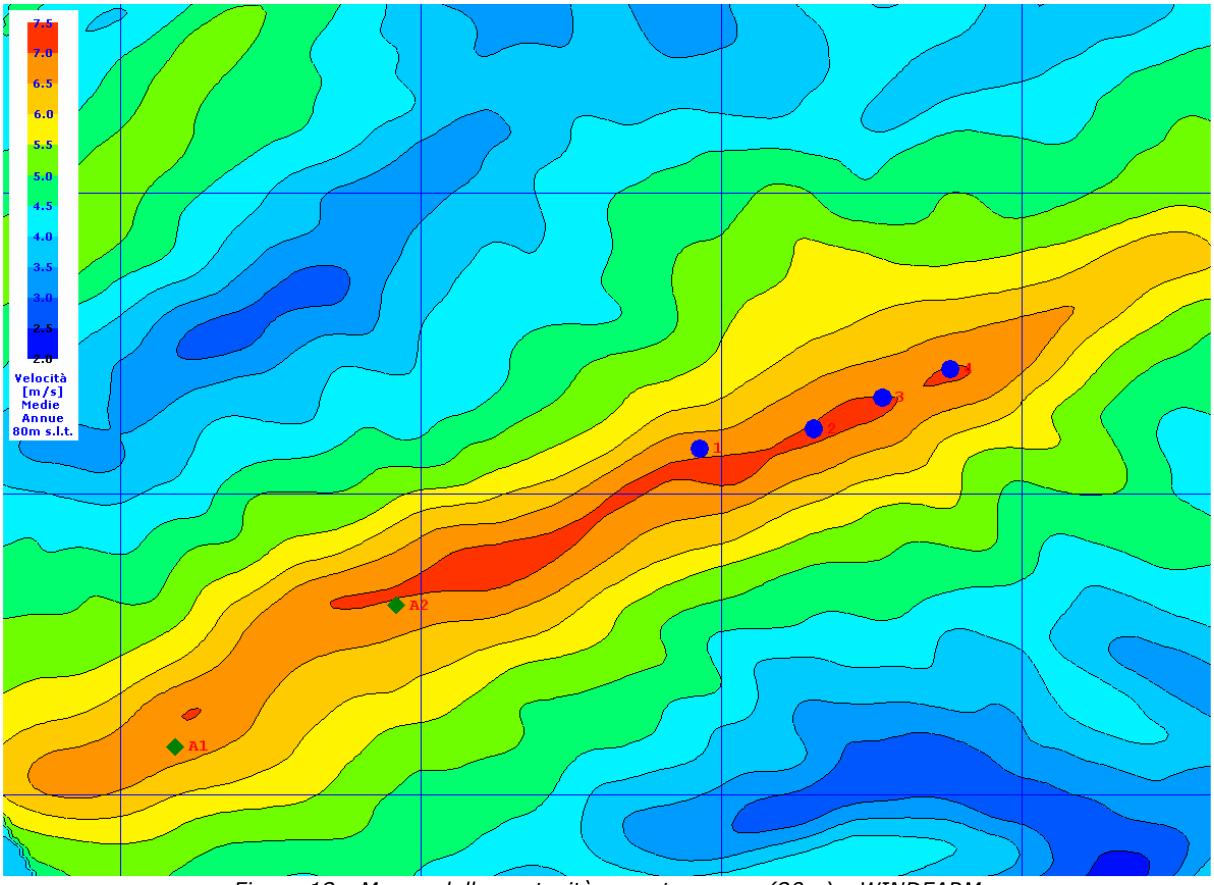


Figura 18 - Mappa della ventosità a quota mozzo (80m) - WINDFARM

I dati utilizzati per la Wind Analysis sono quelli relativi ai sensori posti a quota 40m e 20m, misurati dal 01/09/02 al 31/08/03 presso la stazione anemometrica 0702. I valori relativi alla temperatura non sono stati rilevati, per questo si fa ricorso agli algoritmi standard internazionali (International Standard Atmosphere), in base ai quali, considerando la quota media (s.l.m.) dei rotori dei quattro aerogeneratori (610m), la temperatura media annua sia pari a 11.04°C, a cui corrisponde una densità media dell'aria pari a 1.155 kg/mc.

Per la stima della producibilità media annua si è ipotizzato l'utilizzo di macchine Enercon modello E82 da 2000 kW di potenza nominale ed altezza del mozzo pari a 80m.

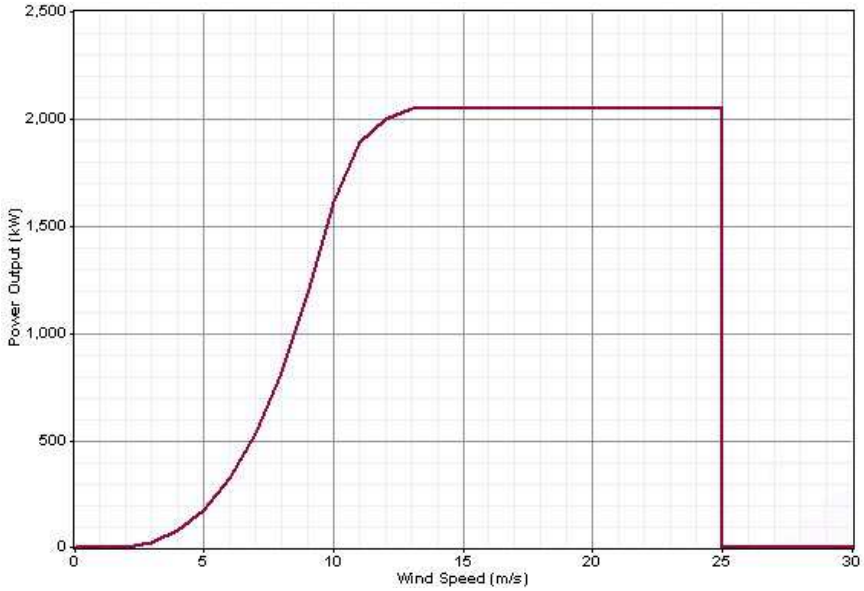


Figura 19 – Curva di Potenza Enercon E82

Il modello del terreno impiegato per l'analisi, è basato su una superficie quotata di 10km x 5km, con isoipse ogni 5m. I valori relativi alla producibilità stimata ed alle relative perdite sono di seguito riassunti:

Turbina	Base [GWh]	Topo [%]	Wake [%]	E annua [GWh]
AG01	6.2183	-18.44	-0.01	5.0709
AG02	6.2183	-16.06	-0.03	5.2176
AG03	6.2183	-16.65	-0.06	5.1791
AG04	6.2183	-16.63	-0.04	5.1816
TOT	**24.8732**	**-16.95**	**-0.03**	**20.6492**

Tabella 6 - Producibilità media annua (WindFarm)

Complessivamente quindi, la producbilità media annua lorda si attesta su 20.6492 GWh, corrispondenti a circa 2580 Ore equivalenti; tale stima è al lordo di tutte le altre fonti di perdita (escluse quelle per effetto scia ed effetto orografico), queste si possono diversificare nel modo seguente:

Fattore di Perdita	**Valore**
Indisponibilità della Macchina	3%
Perdite elettriche	3%
Ghiaccio e degrado della pala	4%
TOTALE	**10%**

Tabella 7 - Coefficienti di perdita

A valle della depurazione dai suddetti fattori di perdita, la stima della producibilità, si attesta su 18.564 GWh ovvero un totale di ore equivalenti pari a circa 2320.

Per quanto concerne le ore di funzionamento su base annua, per il modello di turbina considerato, esse si attestano su 7900 Ore/anno corrispondenti a circa il 90.2%.