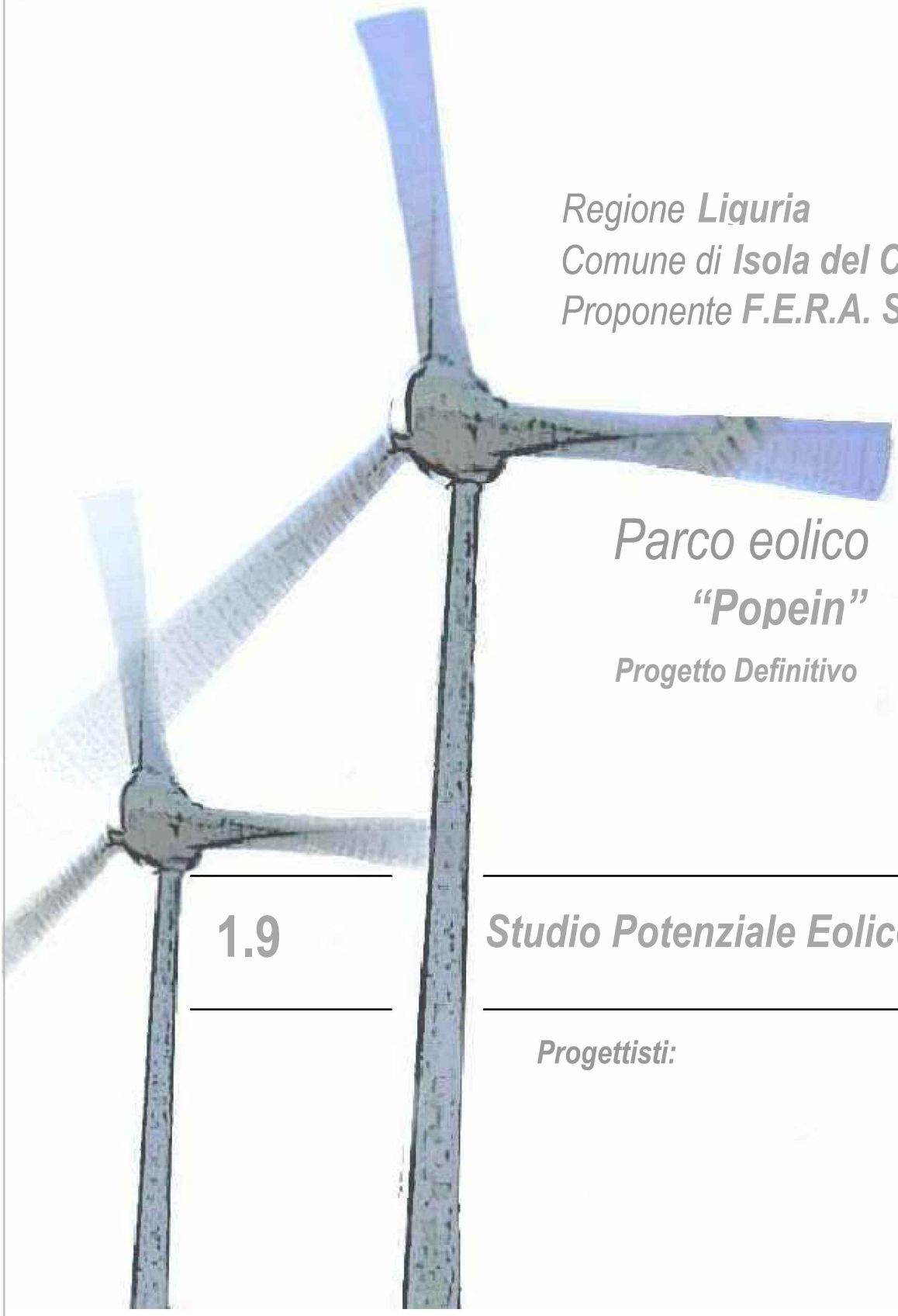
Fabbrica Energie Rinnovabili Alternative
GENERAZIONE POSSIBILE

Fabbrica Energie Rinnovabili Alternative S.r.l.
Piazza Cavour, 7 - 20121 Milano
T: +39 02 62690471 F: +39 02 32066804
info@ferasrl.it; www.ferasrl.it
P.IVA 13393960151

Azienda con sistema di gestione qualità
certificato UNI EN ISO 9001:2008
certificatI n. 501008849 e 501008850



Regione **Liguria**
Comune di **Isola del Cantone**
Proponente **F.E.R.A. S.r.l.**

Parco eolico "Popein"

Progetto Definitivo

1.9 Studio Potenziale Eolico

Progettisti:

Data	Rev.	Descrizione	Elaborato	Controllato	Approvato
30.04.2013	A	Progetto Definitivo	Di Taranto	Canavero	Bertuccio

Comm. **Elaborato:** IDC-1.9_Studio Potenziale Eolico

E' vietata la riproduzione del presente documento, anche parziale, con qualsiasi mezzo, senza l'autorizzazione di F.E.R.A. S.r.l.

Indice

1 DESCRIZIONE DEL SITO **6**

2 LAYOUT IMPIANTO E STAZIONI DI MISURA **7**

3 *STRUTTURA "0729"* **8**

3.1 Descrizione anemometro *8*

3.2 Analisi dati vento *10*

3.3 Profilo verticale della velocità *12*

3.4 Turbolenza misurata dall'anemometro *13*

3.5 Velocità estreme *15*

4 DESCRIZIONE AEROGENERATORI **18**

5 DESCRIZIONE MODELLO DI SIMULAZIONE **19**

6 RISULTATI ANALISI DI PRODUCIBILITÀ **21**

7 CONCLUSIONI **24**

Indice delle figure

Figura 1: Orografia, quadro generale e di dettaglio. 6

Figura 2: Isola del Cantone, layout aerogeneratori e posizione stazione di misura, A1 0729 7

Figura 3: 0729, Area anemometro viste verso Nord, Est, Sud e Ovest. 8

Figura 4: 0729: Schema struttura anemometrica. 9

Figura 5: Tipologia sensori installati. 10

Figura 6: 0729, rosa del vento in frequenza e contributo energetico per settore di provenienza. 11

Figura 7: 0729, distribuzione in frequenza della velocità media misurata a 40m. .. 11

Figura 8: 0729, profilo verticale medio per direzione di provenienza 12

Figura 9: 0729, profilo verticale medio su tutti i records registrati. 13

Figura 10:grafico e parametri di turbolenza 14

Figura 11: Isola del Cantone, mappa isovento a 100m dal suolo 21

Figura 12: Mappa isovento a quota 100 m calcolata con software WindSim 22

Figura 13: Propagazione della scia per ogni aerogeneratore considerato (rappresentato dal triangolo) 23

Indice delle tabelle

Tabella 1: Layout di Isola del Cantone, coordinate aerogeneratori 7

Tabella 2: 0729, sintesi delle grandezze misurate..... 10

Tabella 3: 0717, Medie della velocità sui 10 minuti, misurate a 30m dal suolo, afferenti a tempeste indipendenti 16

Tabella 4: 0717, Parametri utilizzati nell'analisi della velocità estrema con le "Norme tecniche delle Costruzioni". 17

Tabella 5: Modelli e caratteristiche degli aerogeneratori considerati 18

1 Descrizione del sito

L'area in esame si trova all'interno dell'Appennino Ligure, alle spalle della città di Genova, su un crinale allineato secondo le direzioni Est-Ovest, affacciato sulla valle del fiume Scrivia.

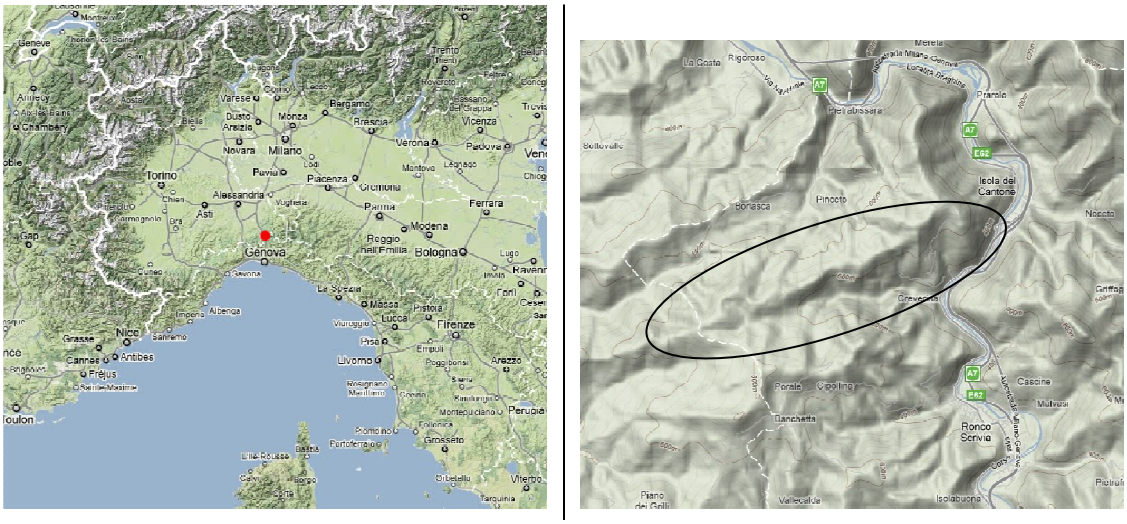


Figura 1: Orografia, quadro generale e di dettaglio.

In Figura 1 si vede come la valle del fiume Scrivia, orientata in direzione Nord-Sud, costituisce un corridoio preferenziale a bassa quota per le masse d'aria in attraversamento dell'Appennino. Le componenti della ventosità non allineate con la direzione della valle sono invece trascurabili a bassa quota a causa dell'interazione con la catena Appenninica.

A livello di dettaglio si nota come l'orografia sia caratterizzata da crinali paralleli orientati in direzione perpendicolare alla direzione attesa dei venti prevalenti. Il crinale interessato dal progetto risulta in parte sottomesso in quota rispetto al parallelo crinale posto immediatamente a Sud. Ciò provoca una influenza sulla ventosità sfruttabile sul crinale interessato dal progetto in termini di direzione ed intensità della velocità.

2 Layout impianto e stazioni di misura

Il layout proposto ricade interamente in Regione Liguria, Provincia di Genova e Comune di Isola del Cantone, in Tabella 1 sono riportate le coordinate degli aerogeneratori nel formato UTM WGS84.

L'area si sviluppa su circa 1,3 km di un crinale orientato secondo le direzioni Est-Ovest e posto intorno alla quota di 650 m sul livello del mare.

La superficie si presenta interamente boscata, con altezza media della vegetazione sull'area di crinale minore di 10 m. Non sono presenti discontinuità evidenti sull'area del layout, sia come tipologia di copertura che come caratteristiche della superficie.

ID torre	Northing	Easting
1	44°38'04.21"	8°55'04.17"
2	44°38'09.54"	8°55'20.25"
3	44°38'06.95"	8°55'29.02"
4	44°38'13.23"	8°55'43.99"
5	44°38'18.73"	8°55'58.38"

Tabella 1: Layout di Isola del Cantone, coordinate aerogeneratori

Per caratterizzare dal punto di vista anemologico l'area in esame sono stati utilizzati i dati registrati dalla struttura di misura denominata "0729".

In Figura 2 sono visibili le posizioni degli aerogeneratori e dell'anemometro in sovrapposizione ad ortofoto.

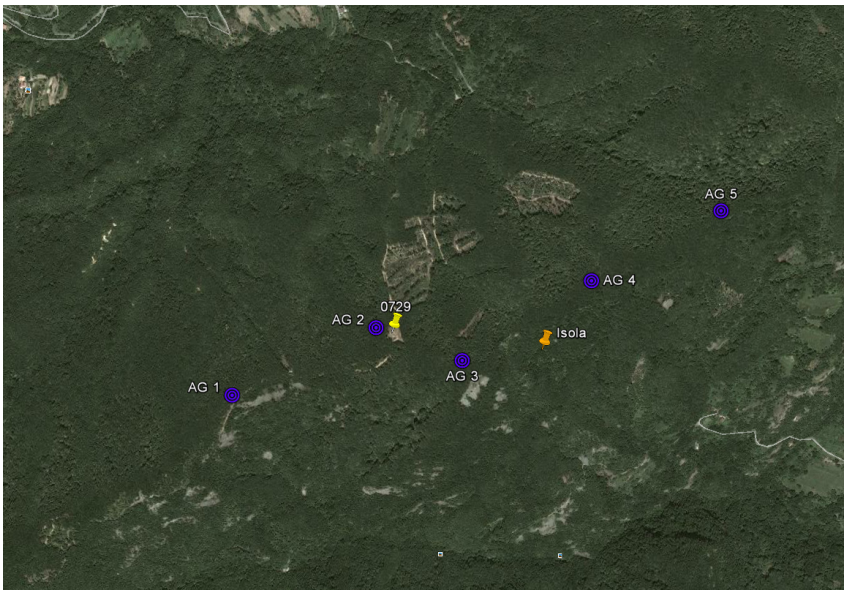


Figura 2: Isola del Cantone, layout aerogeneratori e posizione stazione di misura, A1 0729

3 *Struttura "0729"*

La struttura di misurazione con codice 0729 si trova in Regione Liguria, Provincia di Genova nel territorio Comunale di Isola del Cantone, alle coordinate UTM WGS84 32T 493874m Est e 4942505m Nord, ad una quota di 676m s.l.m..



Figura 3: 0729, Area anemometro viste verso Nord, Est, Sud e Ovest.

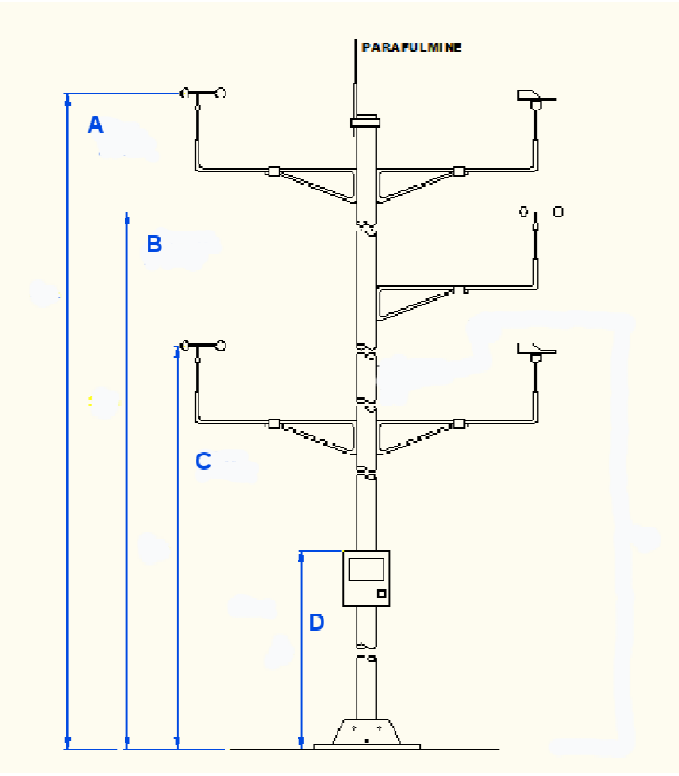
In Figura 3 si nota come tale struttura sia posta all'interno di un'area boscata sulla sommità di un dolce crinale. L'altezza media degli alberi risulta di circa 10m.

Il bosco risulta molto fitto, a fogliame caduco e soggetto a periodiche pulizie.

3.1 DESCRIZIONE ANEMOMETRO

La struttura di misurazione è costituita da un sostegno tubolare, provvisto di supporti sensori di lunghezza 1,5m su cui sono montati 3 sensori calibrati di velocità e 2 sensori di direzione. Le configurazioni utilizzate sono in totale accordo con quanto richiesto della normativa IEC 61400.
La configurazione è visibile in Figura 4.





Altezze da terra dei sensori:
A 40m; **B** 38m;
C 22m; **D** 3m;

Figura 4: 0729: Schema struttura anemometrica.

I sensori di velocità installati sono del tipo NRG Maximum #40C nuovi e calibrati, i sensori di direzione sono del tipo NRG #200P nuovi (Figura 5). I dati misurati sono registrati tramite Logger Nomad II della Secondwind su un supporto di memoria non volatile. Vengono calcolate e registrate le seguenti grandezze:

Sensori di velocità: Velocità media sull'intervallo di 10 minuti, valore massimo e deviazione standard sullo stesso intervallo di tempo;

Sensori di direzione: Direzione media sull'intervallo di 10 minuti e devizione standard sullo stesso intervallo di tempo;

Viene inoltre registrata la temperatura all'interno dell'involucro del Logger.

	**NRG Maximum #40C**		**NRG #200P**

Figura 5: Tipologia sensori installati.

3.2 ANALISI DATI VENTO

L'anemometro 0729 ha iniziato a registrare il giorno 7 Ottobre 2010 fino al 15 Ottobre 2012.

In Tabella 2 sono riportate le medie mensili registrate dall'anemometro 0729 alle varie quote di misura.

Variable	***C1_40m_Ave***	***C2_38m_Ave***	***C3_22m_Ave***
Measurement height (m)	40	38	22
Mean wind speed (m/s)	5.23	5.19	4.6
Max wind speed (m/s)	22.87	21.84	20.48
Weibull k	1.591	1.593	1.509
Weibull c (m/s)	5.844	5.786	5.108
Frequency of calms (%)	12.73	12.77	17.44

Tabella 2: 0729, sintesi delle grandezze misurate

In Figura 6 sono riportate la rosa del vento in frequenza e il contributo energetico del vento suddiviso per settore di provenienza.

Le direzioni regnanti (a maggiore frequenza) e dominanti (caratterizzate dalla maggiore intensità della velocità) coincidono, per cui sono ben definite le due direzioni Principali, in particolare sembra essere con maggiore contributo energetico la direzione Sud-Ovest.

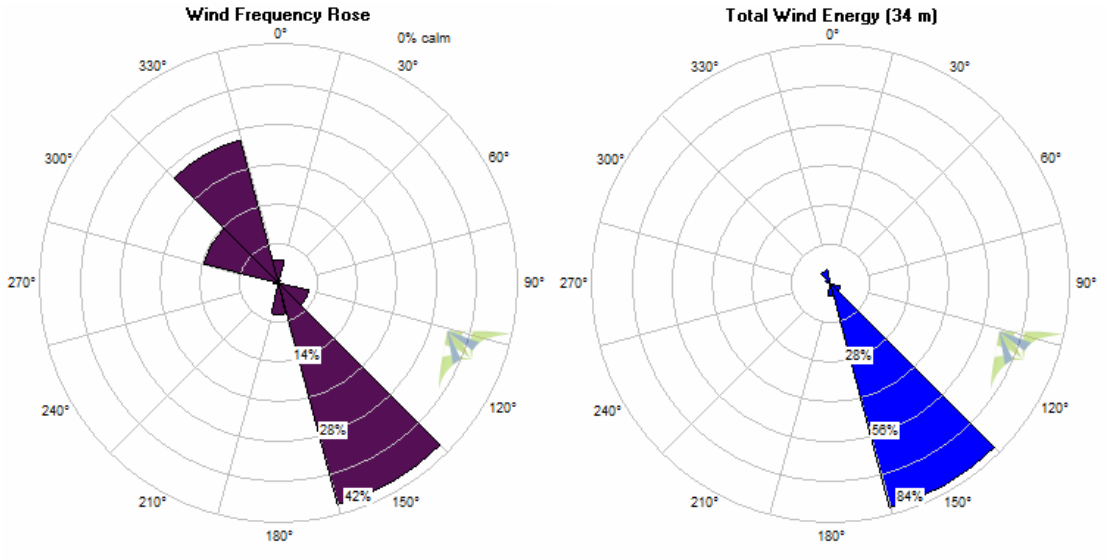


Figura 6: 0729, rosa del vento in frequenza e contributo energetico per settore di provenienza.

In Figura 7 è riportata la distribuzione in frequenza della velocità media sui 10 minuti, misurata a 40m dal suolo. Sovrapposta ad essa è la curva di Weibull che meglio interpola i valori.

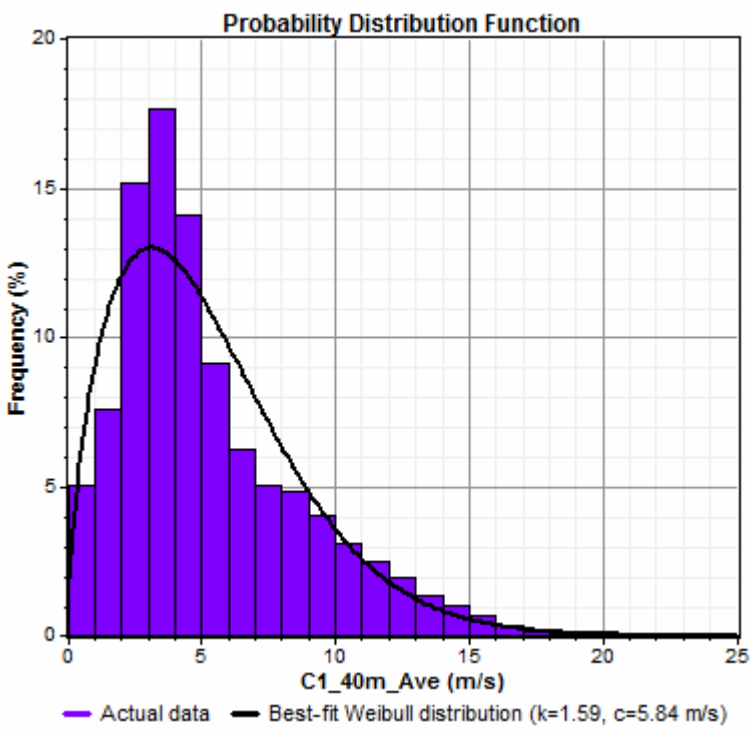


Figura 7: 0729, distribuzione in frequenza della velocità media misurata a 40m.

La disposizione dei sostegni dei sensori è tale da minimizzare gli effetti di ombreggiamento sulle misurazioni da parte della struttura di sostegno.

3.3 PROFILO VERTICALE DELLA VELOCITÀ

Il profilo verticale risulta influenzato dai seguenti fattori:

Curvatura della superficie: In questa dipendenza c'è la direzione di provenienza del vento. Nel caso del sito dove è installato l'anemometro 0729 la curvatura superficiale nei pressi dell'anemometro è poco percepita alle quote di misura anche a causa della vegetazione.

Rugosità superficiale: Nel caso del sito dove è installato l'anemometro 0729 la copertura boschiva fino a 10m dal suolo potrebbe richiedere l'introduzione di una *displacement height*, per cui influenza in maniera significativa la forma del profilo verticale della velocità.

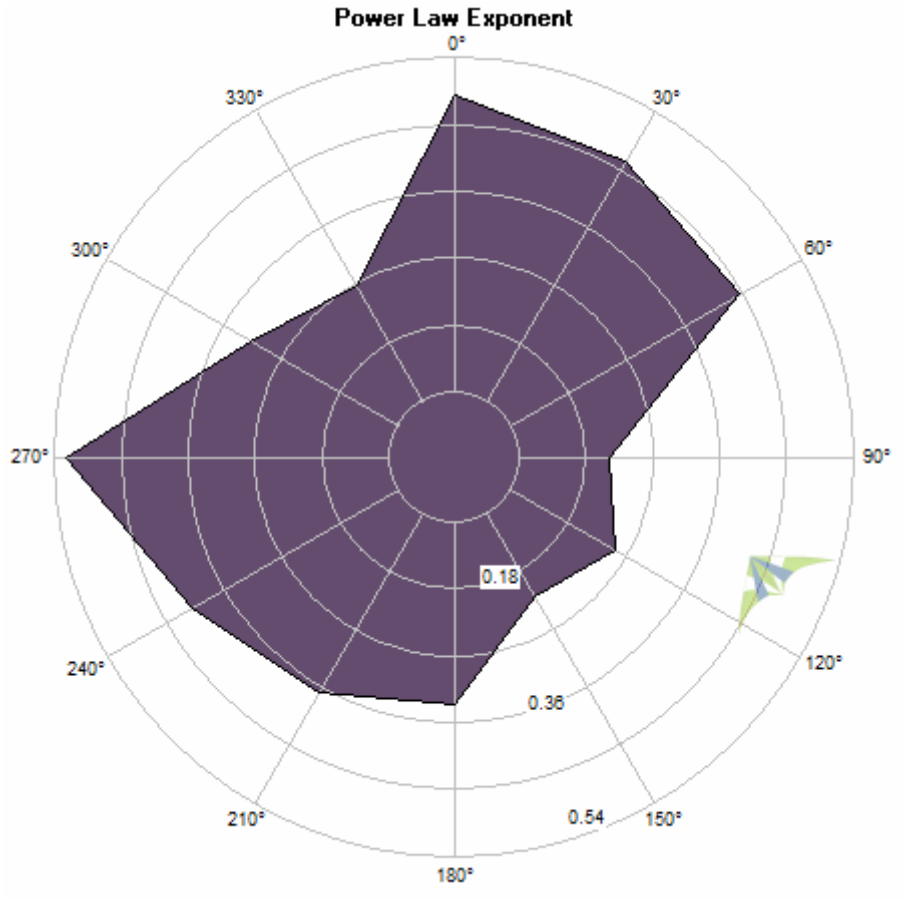


Figura 8: 0729, profilo verticale medio per direzione di provenienza

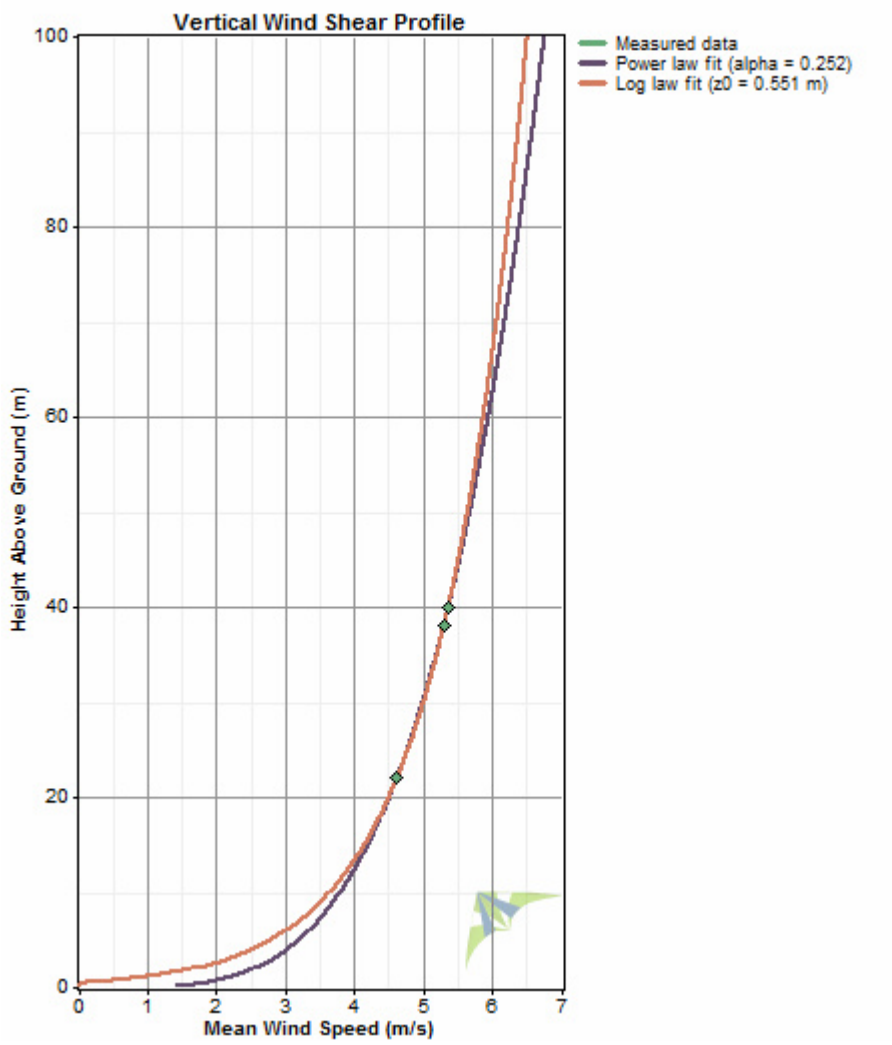


Figura 9: 0729, profilo verticale medio su tutti i records registrati.

In definitiva si ritiene che il profilo logaritmico che interpola i valori medi misurati fino a 40 m permetta una discreta estrapolazione in quota. È da aspettarsi una variazione del profilo misurato a seconda della presenza o meno del fogliame sulle piante di alto fusto che circondano l'anemometro.

L'interpolazione dei valori misurati, con l'introduzione di un offset verticale di 6m per tenere conto della presenza del bosco, ha portato a ricavare una lunghezza di rugosità pari a 0.15 m ed un esponente per il profilo esponenziale di 0.21.

3.4 TURBOLENZA MISURATA DALL'ANEMOMETRO

I valori di deviazione standard della velocità media registrati dai sensori dell'anemometro 0729 sono stati utilizzati per ricavare una stima della turbolenza presente sull'area interessata dal progetto.

In questo contesto si indica con turbolenza le variazioni casuali della velocità misurata intorno al valore medio sui 10 minuti.

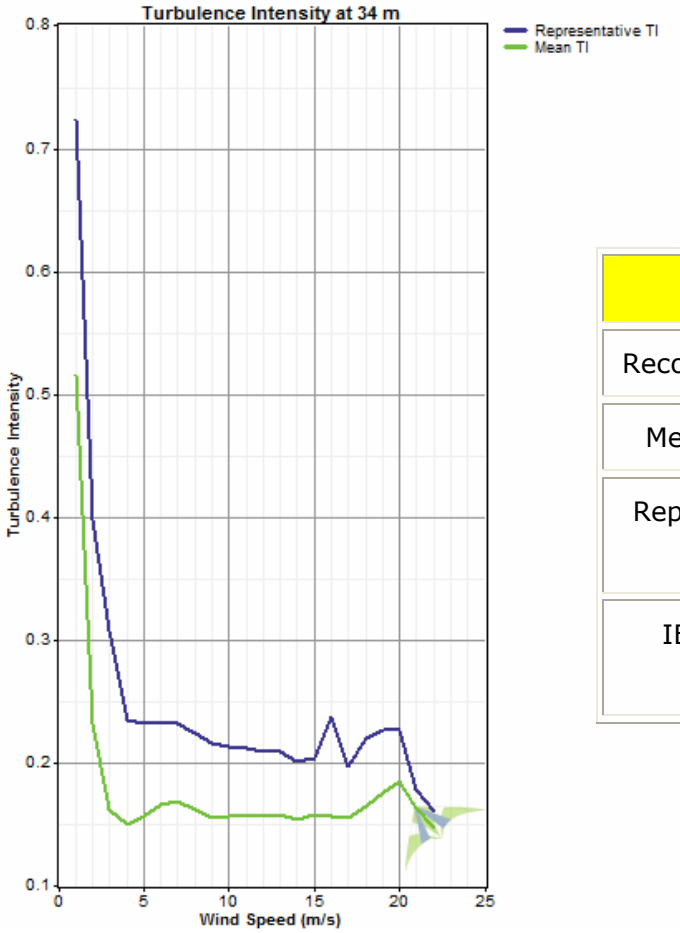
In particolare si ricava l'intensità della turbolenza I per ogni misurazione di velocità relativa al rispettivo intervallo di 10 minuti ed alla quota di misura tramite la formula seguente:

$$I = \frac{\sigma_i}{U_i}$$

Dove σ è la deviazione standard relativa all'intervallo di 10 minuti in esame, mentre U è la relativa velocità media.

All'interno della 3° edizione dello standard IEC 61400-1 vengono definite 4 categorie in funzione dei livelli di intensità di turbolenza media a 15 m/s.

In Figura 10 sono riportati i valori dell'intensità di turbolenza media e il valore rappresentativo al 90° percentile.



Quantity	Value
Records in 15 m/s bin	733
Mean TI at 15 m/s	0.158
Representative TI at 15 m/s	0.204
IEC3 turbulence category	A

Figura 10:grafico e parametri di turbolenza

3.5 VELOCITÀ ESTREME

Non sono disponibili serie storiche di dati con sufficiente estensione temporale, tale da permettere di effettuare un'analisi della Classe IEC del sito, tramite metodologia di Gumbel classica.

Per questo motivo l'analisi della Classe del sito è stata effettuata utilizzando il codice "Norme Tecniche delle Costruzioni" ed il metodo delle tempeste indipendenti sulle serie temporali disponibili presso l'anemometro con codice 0717 installato a poca distanza dal sito in oggetto.

Il procedimento delle tempeste indipendenti è stato condotto come di seguito descritto:

1. Individuazione sulle serie temporali misurate sul sito 0717 delle velocità medie sui 10 minuti massime causate da perturbazioni indipendenti.
2. La velocità media misurata negli intervalli prima descritti è relativa al sensore attivo più alto sulla struttura.
3. Si considera il valore misurato dal sensore più alto disponibile come rappresentativo della velocità a quota mozzo. Non viene eseguita quindi alcuna estrapolazione in quota. L'errore che si commette è piccolo in quanto il profilo verticale misurato risulta molto verticale.
4. Si esegue l'interpolazione sulla distribuzione di dati così individuata, la frequenza è corretta in maniera coerente con l'intervallo di tempo medio ottenuto.

In *Tabella 3* sono riportati i dati utilizzati in quanto considerati afferenti a tempeste indipendenti, mentre in *Tabella 4* sono riportati i parametri utilizzati nell'analisi della velocità estrema con le "Norme tecniche delle Costruzioni".

V. media a 30m $\frac{m}{s}$	Data accadimento
23.00	05/02/2007
17.50	28/02/2007
22.00	18/03/2010
22.00	27/05/2010
24.00	25/06/2007
19.00	14/07/2010
19.50	09/11/2007
19.80	2/12/.2007
23.50	11/03/2008
27.70	30/11/2009
24.70	23/12/2009
25.80	26/03/2010
21.00	10/05/2010
18.80	22/07/2010
24.00	27/08/2010
22.00	04/10/2010

Tabella 3: 0717, Medie della velocità sui 10 minuti, misurate a 30m dal suolo, afferenti a tempeste indipendenti

Sito	0729	
Quota	676.00	m
Altezza torre	80.00	m

MACROZONA

Velocità di riferimento

Velocità media su 10 minuti a 10m dal suolo su terreno di 2a categoria. Ha un periodo di ritorno di 50anni cioè può essere superata nell'anno con il 2% di probabilità

Macrozona	7.00	
Vref0	28.00	$\frac{m}{s}$
a_0	1000.00	
k_a	0.02	
V_{ref}	28.00	$\frac{m}{s}$

PERIODO DI RITORNO

Il periodo di ritorno richiesto dalle IEC per la Vref è di 50anni

Vref	28.00	$\frac{m}{s}$

MICROZONIZZAZIONE

Esposizione

Classe di rugosità del terreno	C	
Categoria di esposizione del sito	III	
Kr	0.20	
Z0	0.10	
Zmin	5.00	
α	6.68	
Elevazione crinale	400.00	m
Larghezza	4000.00	m
H/D	0.100	
z/H	0.20	
β	0.50	
γ	0.00	
C_t	1.00	
Topografia		
Introduco quindi sulla Vref gli effetti locali e l'altezza dal suolo		
V_{mz}	**37.43**	$\frac{m}{s}$

Tabella 4: 0717, Parametri utilizzati nell'analisi della velocità estrema con le "Norme tecniche delle Costruzioni".

I risultati che si ottengono con le due metodologie di analisi sono:

Norme tecniche costruzioni	37.43m/s	Rientra nella Classe IEC III
Distribuzione di Gumbel	38.61m/s	Rientra in Classe IEC II

4 *Descrizione aerogeneratori*

Si è optato per l'installazione di aerogeneratori con configurazione classica tripala sopravento e torre tubolare. In base a condizioni di viabilità di accesso e morfologiche è stata definita una classe di potenza per gli aerogeneratori considerati di seguito nelle elaborazioni fluidodinamiche di 1.8-2 MW, con una altezza mozzo massima di 100 m e un diametro del rotore massimo di 100 m. Nella Tabella 5 è riportato l'elenco degli aerogeneratori, e loro caratteristiche, considerati nei calcoli di produzione.

Modello	*Potenza MW*	*Diametro m*	*Altezza mozzo m*
Vestas V100	1.8	100	80, 95
Vestas V100	2	100	80, 90
Vestas V90	2	90	80, 95
Repower MM100	2	100	80, 100
Gamesa G97	2	97	78, 90
Enercon E82	2	82	78, 85, 98
Enercon E82	2.3	82	98
Enercon E92	2.35	92	98
Enercon E101	3	101	99
Enercon E115	2.5	115	92.5

Tabella 5: Modelli e caratteristiche degli aerogeneratori considerati

5 Descrizione modello di simulazione

Per stimare la produzione elettrica annuale per l'impianto a progetto sono stati eseguiti i seguenti passi:

- La serie temporale misurata dalla stazione "0729" è stata estrapolata alla quota mozzo di 100 m, sfruttando il profilo esponenziale che meglio interpola i valori misurati raggruppati per settore di provenienza del vento.
- La seria temporale a quota mozzo è stata utilizzata per ricavare una distribuzione in frequenza annuale per la velocità del vento. L'errore stagionale introdotto dalla copertura irregolare sull'arco temporale delle serie storiche è stato adeguatamente corretto.
- La distribuzione in frequenza annuale della velocità relativa alla misura estrapolata a quota mozzo sulla posizione dell'anemometro "0729", unitamente al modello digitale del terreno, hanno permesso di simulare il flusso aerodinamico sul sito.
- Le caratteristiche degli aerogeneratori prescelti permettono di ottenere l'energia elettrica prodotta annualmente date le condizioni della ventosità a quota mozzo sulla posizione stessa dell'aerogeneratore.

La simulazione numerica del flusso aerodinamico è stata condotta per una velocità di riferimento per ognuno dei 12 settori di provenienza del vento in cui è stata suddivisa la rosa del vento. In base alla distribuzione in frequenza annuale della velocità introdotta il contributo di ogni singolo settore di provenienza del vento, è stato adeguatamente pesato per ottenere la ventosità media annuale prevista e dalla curva di potenza dell'aerogeneratore la produzione elettrica.

A questo proposito, per la simulazione numerica e l'integrazione della ventosità e produzione elettrica annuale, sono stati utilizzati i seguenti software commerciali:

WindFarm: Risolve le equazioni linearizzate che regolano il moto dei fluidi, permette di ottenere risultati in modo rapido e tanto più attendibili quanto la geometria del terreno è semplice.

WindSim Risolve le equazioni mediate alla Reynolds[1]. Si ottengono risultati attendibili anche nel caso di geometria del suolo complessa, ma rispetto alla simulazione lineare richiede maggiori risorse computazionali.

I calcoli di produzione energetica sono stati effettuati utilizzando il software WindFarm con il quale sono state stimate le produzioni per tutti gli aerogeneratori di Tabella 5. Successivamente, vista la complessità orografica del sito in oggetto, si è deciso di utilizzare il software WindSim che risolve in maniera non lineare le equazioni di Navier - Stokes, come prova su un solo tipo di aerogeneratore, allo scopo di verificare i risultati ottenuti tramite software lineare WindFarm.

Il modello digitale del terreno utilizzato ha una estensione di $20 * 20\,km$ ed una definizione di $20\,m$ ogni isoipsa.

Per la simulazione con il software *WindSim* si è sfruttata la metodologia del *nesting*[2], ciò ha permesso di ridurre l'ampiezza delle celle sull'area del layout pur includendo una superficie del dominio estesa e un numero di celle di griglia ridotto. In particolare sono state effettuate 3 fasi di *nesting*, per le prime due fasi sono state utilizzate 900000 celle con solutore di tipo *segregated*[3] e 700 iterazioni per ogni simulazione. Nell'ultima fase di *nesting* è stato utilizzato il solutore *coupled*[4], 400000 celle e 100 iterazioni per ogni simulazione. La rugosità superficiale è stata considerata costante e pari a 0.03m.

Con la metodologia descritta si sono inclusi gli effetti della orografia che circonda il sito dell'impianto, anche se posta ad una distanza di qualche chilometro.

Tutte le quote sull'area del layout, quindi le quote mozzo dei generatori e le quote delle misurazioni effettuate dall'anemometro "0729", sono state ridotte di una *displacement height* di 6 m circa per tenere in conto della presenza del bosco.

---

[1] *Approssimazione delle equazioni del moto dei fluidi adatta a risolvere problemi di fluidodinamica in cui la viscosità ha una importanza minore sul moto del fluido rispetto agli effetti delle forze inerziali*

[2] *Tecnica con la quale si eseguono simulazioni in cascata riducendo di volta in volta la dimensione del dominio e utilizzando i risultati della simulazione precedente come condizione al contorno.*

[3] *Tecnica di soluzione in sequenza sui singoli nodi delle equazioni del flusso, caratterizzata da una maggiore stabilità ma minore velocità di convergenza*

[4] *Tecnica di soluzione simultanea sui nodi delle equazioni del flusso*

6 Risultati analisi di producibilità

In Figura 11 è presentata la mappa isovento a 100 m dal suolo ottenuta a partire dai dati misurati su 0729 e analizzati attraverso il software Windfarm. La stessa analisi, eseguita risolvendo in maniera non lineare le equazioni del flusso, porta alla isovento a 100 m dal suolo riportata in Figura 12, confermando quanto previsto dal software Windfarm.

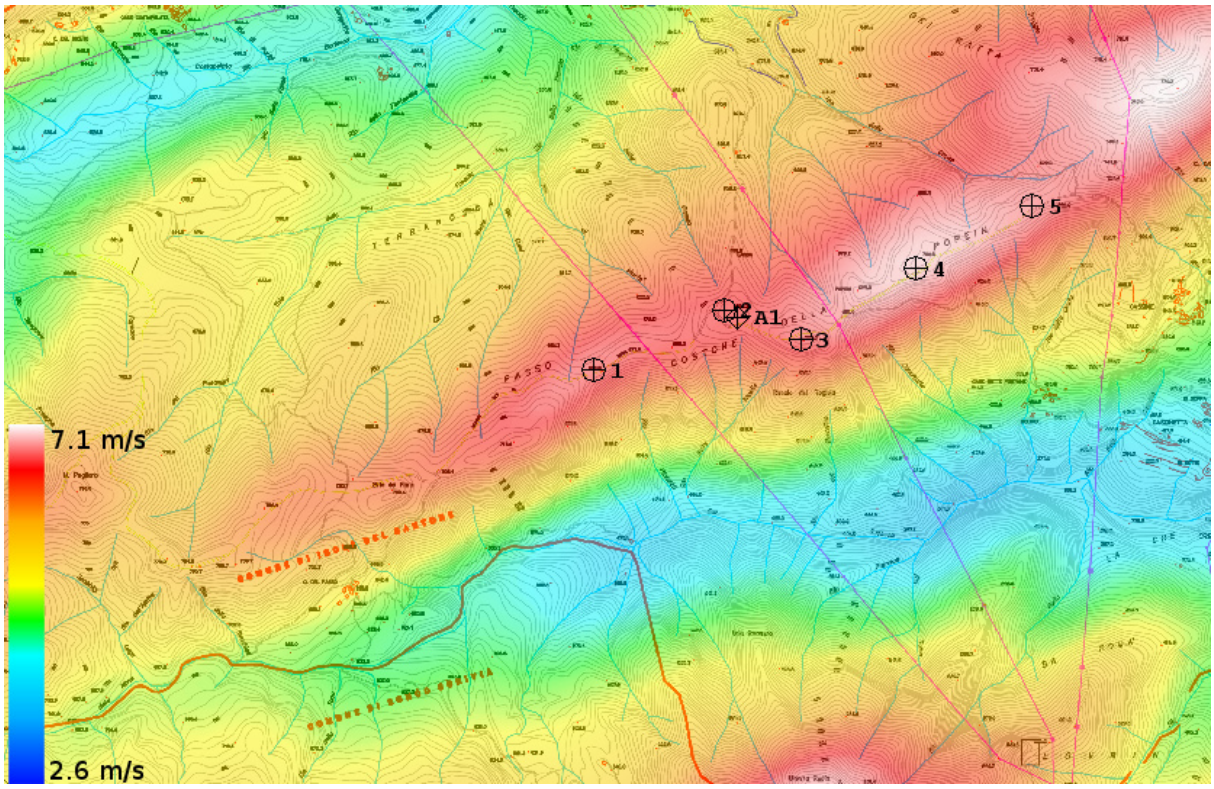


Figura 11: Isola del Cantone, mappa isovento a 100m dal suolo

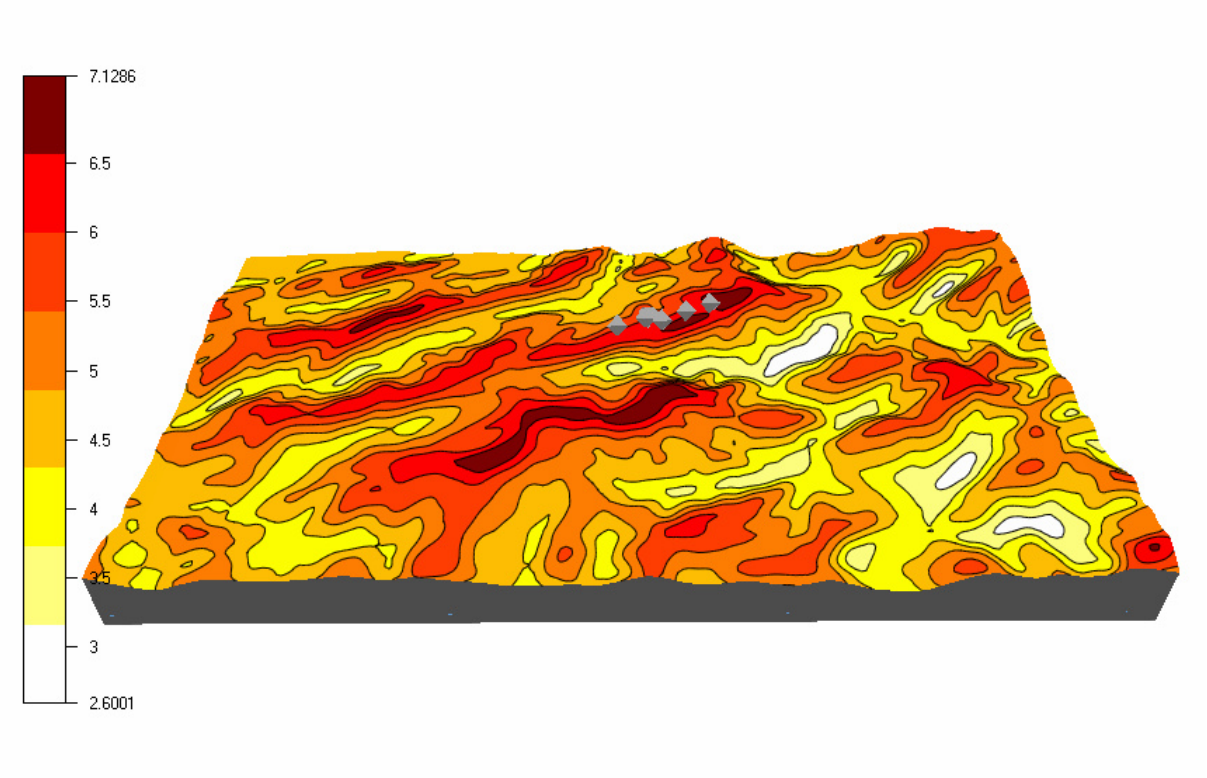


Figura 12: Mappa isovento a quota 100 m calcolata con software WindSim

I calcoli di produzione energetica, effettuati per tutte le tipologie di aerogeneratore elencati nella Tabella 5, hanno portato a stimare un valore pari a circa ***2400 ore equivalenti medie***.

Il valore sopra riportato si riferisce alle ore equivalenti con probabilità di superamento al 50% (P50) al netto delle perdite per effetto scia, ridotta densità dell'aria e il 10% di perdite generali (perdite elettriche, perdite per degradazione delle pale ecc..).

I valori di perdita per effetto scia medi, per le varie tipologie di aerogeneratori considerati, risultano essere molto bassi. Ciò è dovuto al fatto che il crinale in esame risulta essere molto ben esposto ai venti dominanti e regnanti ed il layout risulta essere posto in linea perpendicolare alle direzioni del vento principali, determinando quindi una bassa influenza tra gli aerogeneratori. Ciò è possibile osservarlo nella figura seguente che mostra il modo in cui si propaga la scia a valle e a monte di ogni aerogeneratore (rappresentato dal triangolo) mostrando quindi la quasi nulla interazione tra le macchine.

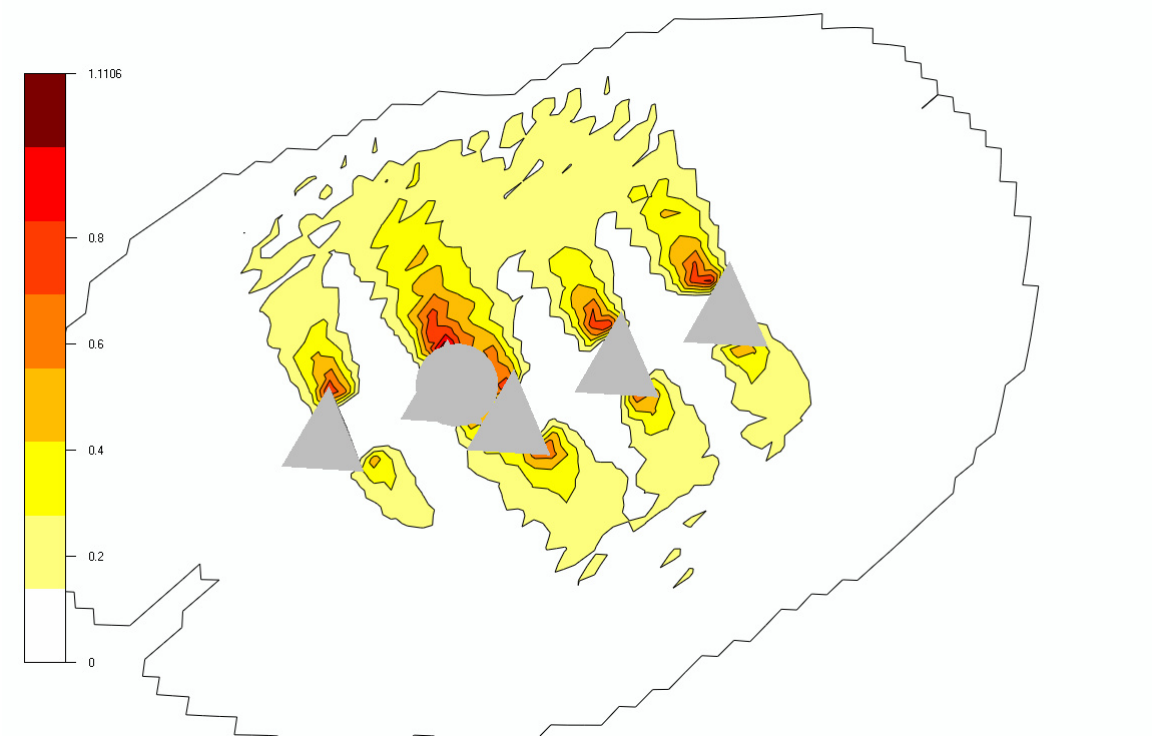


Figura 13: Propagazione della scia per ogni aerogeneratore considerato (rappresentato dal triangolo)

7 Conclusioni

La campagna anemometrica svolta presso il sito in oggetto ha permesso di caratterizzare con buona approssimazione il regime anemologico insistente sul sito. La conoscenza approfondita dell'anemologia dell'area vasta comprendente il sito, derivante da numerose campagne anemometriche svolte in passato e/o tutt'ora in corso in siti vicini e prossimi a quello in oggetto, ha consentito di confermare le previsione fatte nel presente studio. In aggiunta a ciò è stata condotta una ulteriore analisi con software di simulazione fluidodinamica non lineare, al fine di validare i risultati ottenuti con software lineare. L'ottimo accordo tra i due softwares conferma le ipotesi iniziali. La morfologia del crinale e l'esposizione dello stesso, in aggiunta alla disposizione degli aerogeneratori lungo una linea perpendicolare alle direzioni del vento principali, consentono di sfruttare al meglio il flusso di vento che impatta sul sito che accelera in prossimità della parte sommitale, dove si prevede l'installazione delle macchine, sfruttando il salto orografico. Il tutto giustifica ampiamente il prosieguo dell'iniziativa in corso.