

REGIONE SICILIA  
Provincia di Palermo  
COMUNI DI PARTINICO E MONREALE

PROGETTO

POTENZIAMENTO PARCO EOLICO PARTINICO - MONREALE



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE



PROGETTISTA:



**Hydro Engineering s.s.**  
di Damiano e Mariano Galbo  
via Rossotti, 39  
91011 Alcamo (TP) Italy



OGGETTO DELL'ELABORATO:

VALUTAZIONE RISORSA EOLICA E ANALISI DI PRODUCIBILITA'

CODICE PROGETTISTA	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO				
					IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.
	06/05/2018	/	1 di 37	A4	PAR	ENG	REL	0026	00

NOME FILE: PAR-ENG-REL-0026\_00.doc

ERG Wind Sicilia 4 S.r.l. si riserva tutti i diritti su questo documento che non può essere riprodotto neppure parzialmente senza la sua autorizzazione scritta.

CODICE COMMITTENTE					OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV	POTENZIAMENTO PARCO EOLICO PARTINICO-MONREALE VALUTAZIONE RISORSA EOLICA E ANALISI DI PRODUCIBILITA'	2
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0002</b>	<b>00</b>		

Storia delle revisioni del documento

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	06/05/2018	Prima emissione	ERG	ERG	ERG

## PARTINICO-MONREALE

### ***Stima della Producibilità Energetica del parco eolico ripotenziato***

1	26/04/2018	Layout in autorizzazione			
0	27/03/2018	Bozza			
<b>REV.</b>	<b>DATA</b>	<b>ATTIVITÀ</b>	<b>REDATTO</b>	<b>VERIFICATO</b>	<b>APPROVATO</b>

CODICE DOCUMENTO					NOME FILE	PAGINA
PRG	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV	PAR-ENG-REL-0026-01	3 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	PARTINICO-MONREALE (PA) Stima della Producibilità Energetica del impianto eolico ripotenziato	4 di 37
PAR	ENG	REL	0026	1		

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>RAPPRESENTAZIONE DEL SITO</b>	<b>6</b>
2.1	Descrizione del sito	6
2.2	Layout ripotenziato	7
2.3	Aerogeneratori adottati	7
2.4	Allacciamento alla rete elettrica	11
<b>3</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA</b>	<b>12</b>
3.1	Strumenti utilizzati	12
3.2	Raccolta dei dati e validazione	13
3.3	Analisi anemologica e statistica dei dati	14
<b>4</b>	<b>CURVA DI POTENZA</b>	<b>19</b>
<b>5</b>	<b>APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD</b>	<b>22</b>
5.1	Il modello digitale del terreno	22
5.2	La rugosità	24
5.3	La risorsa eolica	25
5.4	Risultati del modello	27
<b>6</b>	<b>ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE</b>	<b>31</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	5 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

## 1 INTRODUZIONE

La Stima della Producibilità Energetica rappresenta la previsione della produzione annuale di un progetto di impianto eolico, che potrebbe essere costruito una volta ottenute tutte le autorizzazioni del caso e verificata la remuneratività del progetto stesso.

Si tratta di uno studio volto a stimare la producibilità di un impianto esistente che viene ripotenziato grazie all'installazione di macchine innovative con potenza unitaria maggiore rispetto alle macchine attualmente installate.

La Stima della Producibilità Energetica è il frutto dell'integrazione fra la metodologia che ERG ha sviluppato riguardo al processo di analisi dei dati provenienti dalle torri anemometriche di riferimento e/o di micrositing, e una procedura di stima basata sulla modellazione del flusso di vento tramite fluidodinamica computazionale (CFD). In merito alla simulazione del flusso di vento, ci si è avvalso del software di modellazione del vento denominato WindSim, mediante in quale vengono implementate le seguenti fasi:

- Calcolo del flusso di vento
- Estrapolazione della V media a quota mozzo
- Calcolo dell'energia annua producibile
- Stima delle perdite per scia

Mentre per le fasi seguenti ci si è avvalsi della procedura di calcolo messa a punto internamente:

- Trattamento e validazione dei dati anemometrici
- Storicizzazione del dato
- Valutazione delle restanti perdite
- Analisi dell'incertezza a cui è sottoposta la stima

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	6 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

## 2 RAPPRESENTAZIONE DEL SITO

### 2.1 Descrizione del sito

L'impianto esistente è situato nella fascia sud della provincia di Palermo e comprende i due comuni di Monreale e Partinico. L'impianto attualmente è costituito da un'unica unità produttiva: composta da 19 turbine eoliche Vestas V52 di potenza complessiva di circa 16 MW.

Il nuovo layout ripotenziato si sviluppa nell'area del parco già esistente e prevede un numero totale di 10 macchine: 4 macchine nel comune di Monreale e 6 macchine nel comune di Partinico.

La zona presenta un'orografia piuttosto complessa: il versante Ovest degrada verso valle in direzione Est e una gola piuttosto marcata divide il sito in due crinali ben distinti.

L'impianto si trova nelle vicinanze di Grisi. Il crinale occidentale è distante circa 2.5 km mentre quello orientale qualche centinaia di metri.

Nelle vicinanze dell'impianto non sono presenti aree boschive degne di nota.



**Fig. 1:** Inquadramento del sito (attuale)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	7 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

## 2.2 Layout ripotenziato

Il layout di impianto è composto da 10 aerogeneratori, dislocati all'interno di territori comunali di Partinico e Monreale.

Gli aerogeneratori sono disposti su due crinali, separati da una gola che divide il sito, come mostrato in Fig. 1.

Le coordinate (UTM WGS84) e le quote relative ad ogni postazione di macchina sono:

Sigla	Coordinate UTM WGS84 F33		Quota (m)
	Est	Nord	
<b>WTG</b>			
<b>R-PAR01</b>	331438	4203600	543,5
<b>R-PAR02</b>	331735	4203242	559,4
<b>R-PAR03</b>	329025	4203047	537,2
<b>R-PAR04</b>	329287	4202650	504,8
<b>R-PAR05</b>	329596	4202326	520
<b>R-MR01</b>	332114	4202952	546,9
<b>R-MR02</b>	332440	4202654	543,8
<b>R-MR03</b>	332802	4202440	507,2
<b>R-MR04</b>	333232	4202167	480,1
<b>R-MR05</b>	329884	4201949	497,1

## 2.3 Aerogeneratori adottati

Per la stima di producibilità energetica di Partinico-Monreale vengono prese in esame tre diverse tipologie di aerogeneratori, di cui si riportano di seguito le relative caratteristiche e curve di potenza garantite dal costruttore a densità media di sito ( $\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ).

Il primo modello è Vestas V136

<b>Modello</b>	<b>V136 4.2</b>
<b>Produttore</b>	Vestas
<b>Potenza (MW)</b>	4.2
<b>Diametro (m)</b>	136.0
<b>Altezza del mozzo (m)</b>	82.0

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	8 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

La curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito per l'aerogeneratore Vestas V136-4.2 MW è la seguente:

<b>Velocità del vento (m/s)</b>	<b>V136 [<math>\rho=1.150</math> m<sup>3</sup>/kg] (kW)</b>
3	43.0
4	207.0
5	447.0
6	800.0
7	1292.0
8	1941.0
9	2724.0
10	3452.0
11	3976.0
12	4174.0
13	4199.0
14	4200.0
15	4200.0
16	4200.0
17	4200.0
18	4200.0
19	4200.0
20	4200.0
21	4200.0
22	4200.0
23	4200.0
24	4200.0
25	4200.0

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	9 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

Il secondo modello preso in esame è:

<b>Modello</b>	<b>N131 3.6</b>
<b>Produttore</b>	Nordex
<b>Potenza (MW)</b>	3.6
<b>Diametro (m)</b>	131.0
<b>Altezza del mozzo (m)</b>	84.0

La curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito ( $\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ) per l'aerogeneratore Nordex N131-3.6 MW è la seguente:

Velocità del vento (m/s)	N131 [ $\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ] (kW)
3	30.0
4	190.0
5	434.0
6	776.0
7	1245.0
8	1858.0
9	2593.0
10	3233.0
11	3541.0
12	3600.0
13	3600.0
14	3600.0
15	3600.0
16	3600.0
17	3600.0
18	3600.0
19	3600.0
20	3600.0
21	3600.0
22	3551.0
23	3186.0
24	2736.0
25	2520.0

In ultimo, il terzo aerogeneratore preso in esame è:

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	10 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

<b>Modello</b>	<b>SWT130</b>
<b>Produttore</b>	Siemens
<b>Potenza (MW)</b>	3.6
<b>Diametro (m)</b>	130
<b>Altezza del mozzo (m)</b>	85.0

La curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito ( $\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ) per l'aerogeneratore Siemens SWT130-3.6 MW è la seguente:

<b>Velocità del vento</b> <b>(m/s)</b>	<b>SWT130 [<math>\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}</math>]</b> <b>(kW)</b>
3	37.0
4	169.0
5	392.0
6	728.0
7	1192.0
8	1791.0
9	2490.0
10	3139.0
11	3494.0
12	3589.0
13	3599.0
14	3600.0
15	3600.0
16	3600.0
17	3600.0
18	3600.0
19	3600.0
20	3600.0
21	3600.0
22	3600.0
23	3600.0
24	3600.0
25	3600.0

Per un ulteriore approfondimento delle curve utilizzate nel software si rimanda al capitolo 6.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	11 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

## 2.4 Allacciamento alla rete elettrica

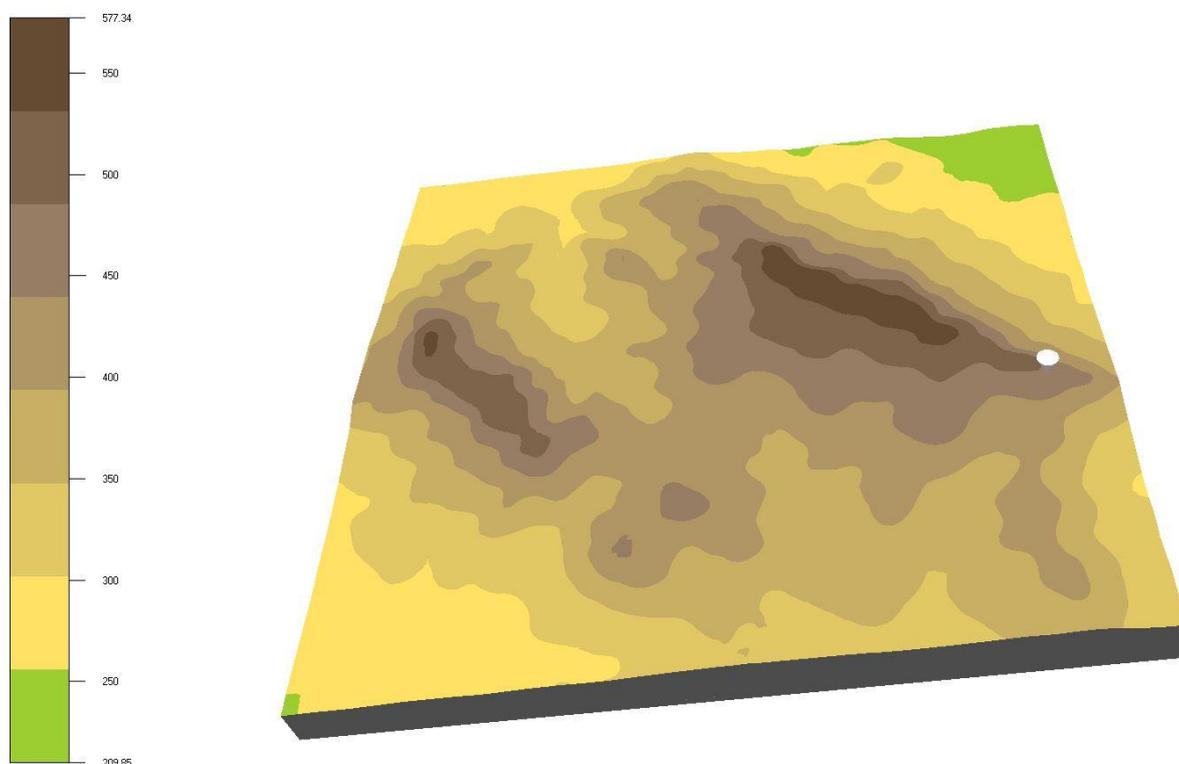
L'impianto attuale è connesso alla rete AT tramite l'adiacente sottostazione di proprietà Enel, situata nel Comune di Partinico (PA).  
Anche il parco eolico in progetto rimarrà collegato nel medesimo luogo.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	12 di 37
PAR	ENG	REL	0026	1		

### 3 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

#### 3.1 Strumenti utilizzati

La campagna anemometrica è stata condotta in sito con una postazione di misura che si trova sul crinale orientale.



**Fig. 2:** Stazione di misura in sito: MR03

Stazione anemometrica	Coord est	Coord nord	Quota (m)	Anemometro	Altezza (m)	dal	al
MR03	333212	4202172	480.2	15IM	10	01/12/2004	01/01/2016
				15HM	30	01/12/2004	01/01/2016

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	13 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

### 3.2 Raccolta dei dati e validazione

Il processo di validazione prevede un controllo manuale per via grafica dei dati grezzi di velocità, direzione e rispettive deviazioni standard tramite software dedicato.



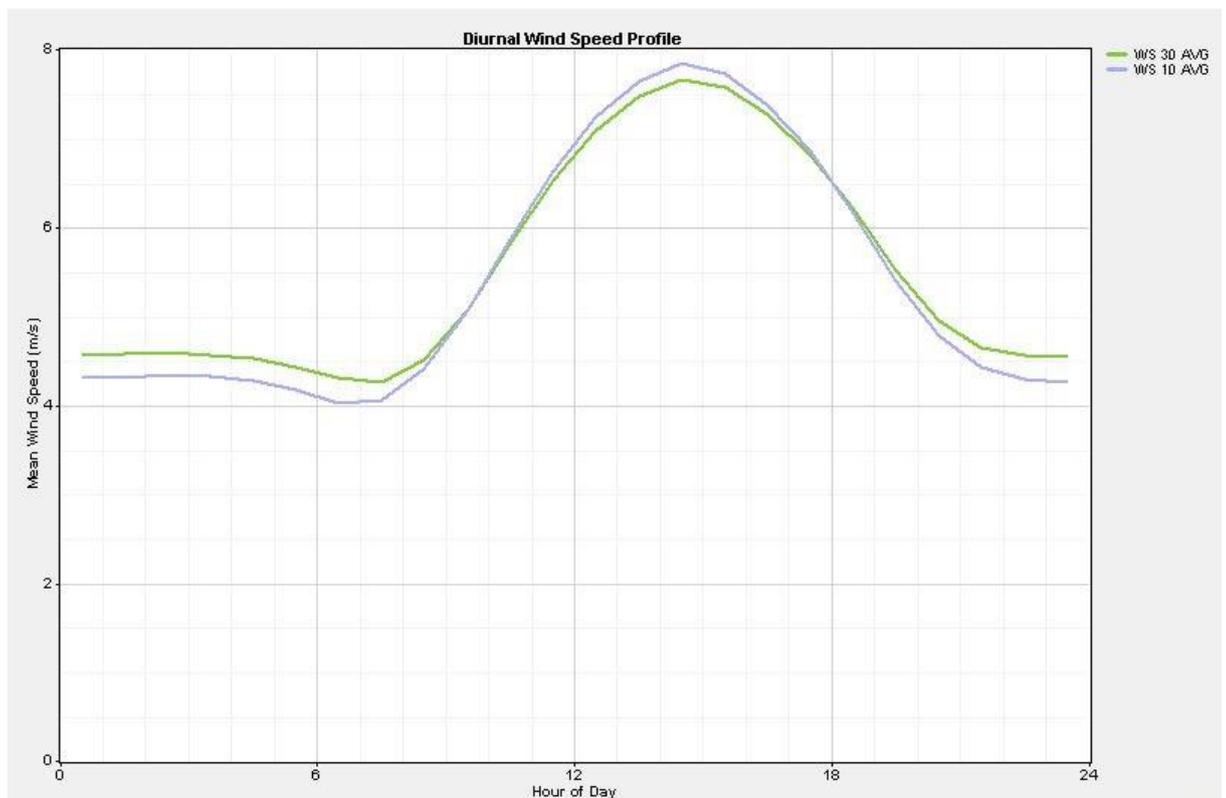
**Fig. 3:** Validazione anemometro

I dati validati vengono raccolti in database protetti, necessari per l'inserimento dei parametri anemometrici nel codice di calcolo CFD e per eventuali altre considerazioni avanzate.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	14 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

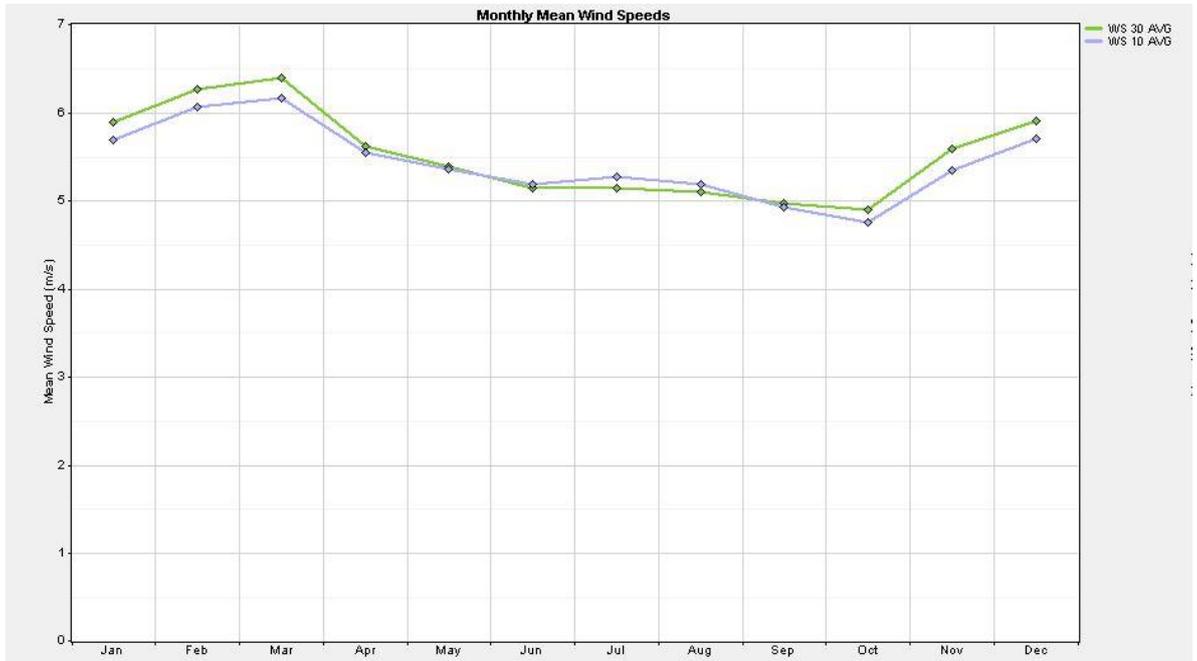
### 3.3 Analisi anemologica e statistica dei dati

A seguito della validazione dei dati si possono stilare le statistiche sulle velocità medie di sito.



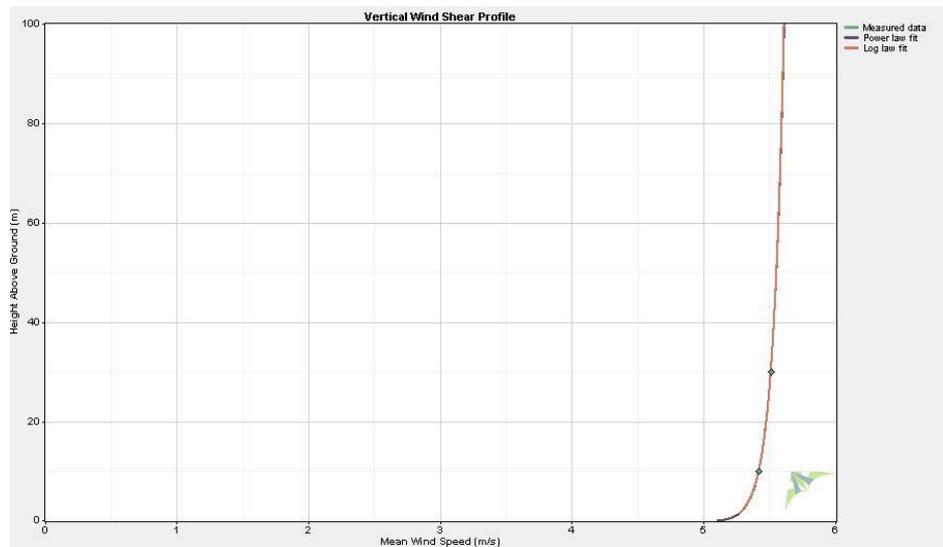
**Fig. 4:** Profilo giornaliero di velocità

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	15 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		



**Fig. 5:** Profilo mensile di velocità

Inoltre, si è in grado di estrapolare il profilo verticale di velocità:



**Fig. 6:** Profilo di velocità verticale

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	16 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

Definito il profilo verticale si è in grado di calcolare il gradiente al suolo della velocità ( $\alpha$ : "wind shear exponent") utilizzando le velocità medie misurate ai diversi sensori.

$$\alpha = \frac{\ln \frac{v_{30m}}{v_{10m}}}{\ln \frac{30}{10}}$$

Il parametro alfa ( $\alpha$ ) consente poi di estrapolare la velocità del vento all'altezza mozzo delle macchine che, nel caso del modello installato (Vesta 52), è pari a 50m:

$$v_{50m} = v_{30m} \left( \frac{50}{30} \right)^\alpha$$

Siccome i dati sono stati collezionati su base oraria ad una massima altezza di 30m è stato necessario procedere con una correlazione tra dati anemometrici e dati scada storici su base energia relativi alla producibilità dell'impianto esistente di Monreale-Partinico.

La serie storica di dati scada della produzione di energia di impianto è stata rielaborata con la serie di dati scada di downtime (periodo:2005-2016) per calcolare anno per anno la producibilità mensile e quindi definire il dato di producibilità annua storica (si riporta di seguito)

<b>Monreale Partinico</b>	2005 [MWh]	2006 [MWh]	2007 [MWh]	2008 [MWh]	2009 [MWh]	2010 [MWh]	2011 [MWh]	2012 [MWh]	2013 [MWh]	2014 [MWh]	2015 [MWh]	2016 [MWh]	ANNO STORICO
JAN	-	3003	2755	3371	3808	4907	1365	2888	4438	4865	3162	3440	3525
FEB	-	3210	3299	2844	3389	5088	2941	3197	2496	2896	3873	4259	3323
MAR	-	3771	2588	3498	4387	2868	3607	2693	4434	2753	3506	3138	3358
APR	-	2549	1235	2990	2489	1744	2538	2836	2608	2979	2830	2814	2598
MAY	1414	1547	2027	2386	1400	2860	2262	2233	2352	1456	2105	2197	1998
JUN	1062	1411	1872	1598	1906	1711	1696	1538	1621	1666	1512	1957	1653
JUL	1590	1871	1508	1895	1211	1269	1251	1635	1162	1503	1141	1651	1465
AUG	1837	1553	2122	1453	1176	1529	1381	1940	1571	1639	1510	1887	1630
SEP	1609	1542	2041	1184	1535	2419	1632	2490	984	1703	620	1363	1601
OCT	1211	1841	1834	10	2623	2694	2553	1983	1225	1745	2539	2149	2055
NOV	2697	1621	3334	0	2566	3982	2513	3144	2788	3211	1829	3285	2818
DEC	3357	1965	3553	32	4488	3640	3805	4724	1894	3639	1032	2456	3200
													<b>29225</b>

**Fig. 12:** Producibilità dell'impianto Monreale-Partinico (V52 0.85MW HH50m)

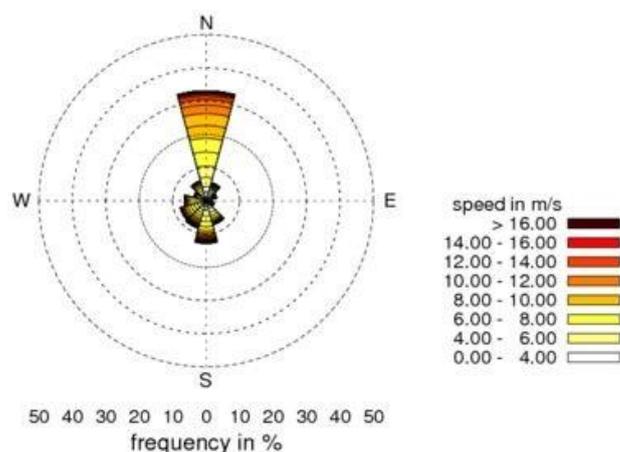
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	17 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

In un secondo momento, a seguito della stima della producibilità “storica” è stato possibile correggere la prima stima di velocità all’altezza mozzo ricalcolandola proprio in base al dato storico. I dati ottenuti vengono trasformati in modo tale da ottenere delle tabelle di frequenza per bin di direzione e di velocità rappresentative dei sensori di velocità e direzione. Ciò rappresenta l’input fondamentale per il calcolo della risorsa eolica tramite modello CFD.

Si ottiene quindi:

site name	MR03-50		
filename	6284-MR03-50		
measurement period	01.12.04 - 31.12.15	# records =	533152
position	x = 333210.0	y = 4202173.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.72	A = 6.51	average = 5.67

Frequency distribution  
◀ ▶ Sector: all Sectors



.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	2.30	1.21	1.22	1.10	1.16	1.40	1.34	1.55	1.82	2.14	1.82	1.78
A	7.57	4.50	3.77	2.77	3.75	5.10	6.28	6.95	6.38	6.47	5.99	5.99
freq	33.1	5.7	3.3	1.9	2.5	7.5	12.8	8.5	8.0	6.5	3.9	6.2
mean	6.58	4.22	3.46	2.59	3.46	4.63	6.01	6.28	5.63	5.64	5.22	5.22

**Fig. 7:** Tabella di frequenze MR03-50m

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	18 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

In fine con le velocità all'altezza mozzo ricalcolare in base alla stima di producibilità storica è stato possibile ricalcolare un nuovo gradiente al suolo ( $\alpha$ : "wind shear exponent".) che meglio rappresentasse il sito nel complesso.

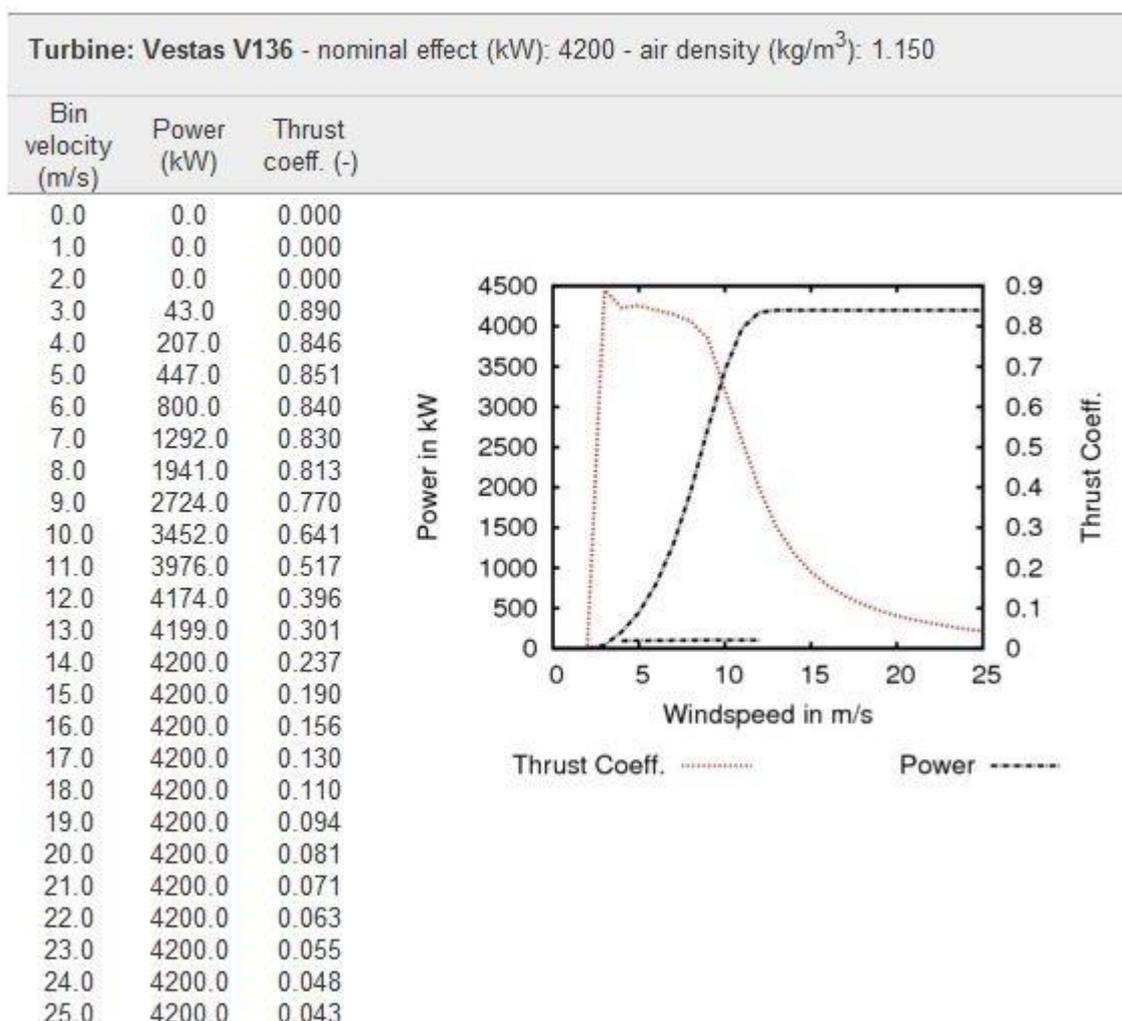
Questo passaggio ci ha consentito di calcolare le velocità medie significative calcolate in diversi punti dell'area dell'impianto alle diverse altezze mozzo studiate (HH=82m, HH=84m e HH85m).

$$v_{HH} = V_{50\text{corretto}} * \left(\frac{HH}{50}\right)^\alpha$$

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	19 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

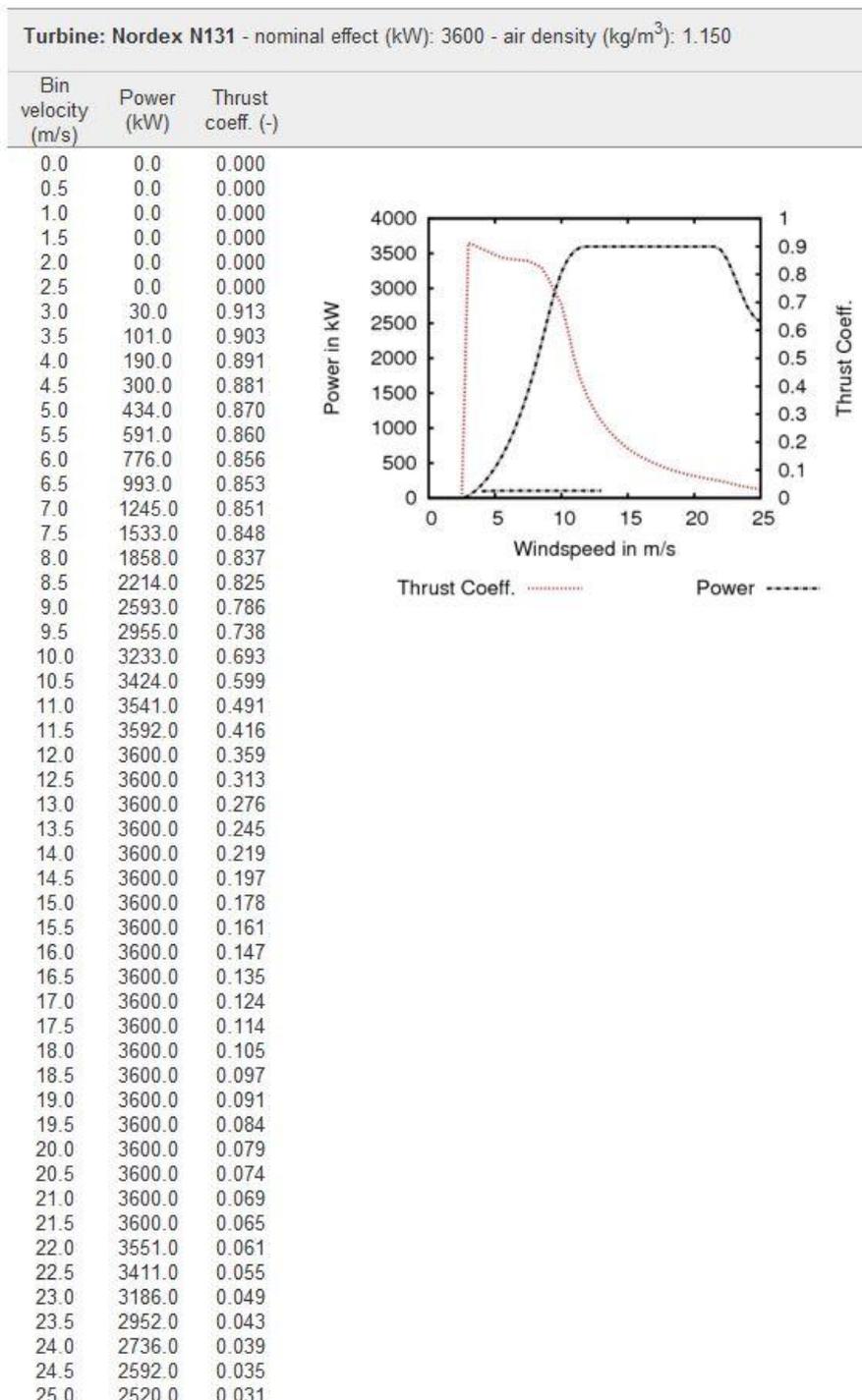
#### 4 CURVA DI POTENZA

La curva di potenza garantita fornita dal costruttore è valida per una densità dell'aria standard pari a  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ; risulta dunque necessario apportare una correzione in base alla densità prevista nelle zone dell'impianto, stimabili in funzione della quota media (c.a. 524 s.l.m. dell'area d'impianto). Si ipotizza quindi un valore di densità dell'aria media pari a  $\rho = 1,150 \text{ kg/m}^3$ .



**Fig. 8:** Aerogeneratore Vestas V136 4.2 MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	20 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

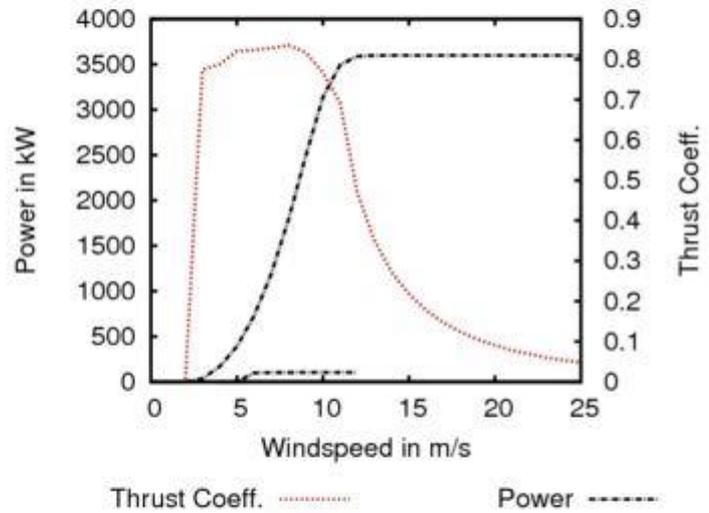


**Fig. 9: Aerogeneratore Nordex N131 3.6 MW**

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	21 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

**Turbine: Siemens SWT130 - nominal effect (kW): 3600 - air density (kg/m<sup>3</sup>): 1.150**

Bin velocity (m/s)	Power (kW)	Thrust coeff. (-)
0.0	0.0	0.000
1.0	0.0	0.000
2.0	0.0	0.000
3.0	37.0	0.775
4.0	169.0	0.788
5.0	392.0	0.820
6.0	728.0	0.823
7.0	1192.0	0.828
8.0	1791.0	0.835
9.0	2490.0	0.817
10.0	3139.0	0.767
11.0	3494.0	0.692
12.0	3589.0	0.469
13.0	3599.0	0.350
14.0	3600.0	0.272
15.0	3600.0	0.218
16.0	3600.0	0.178
17.0	3600.0	0.147
18.0	3600.0	0.124
19.0	3600.0	0.105
20.0	3600.0	0.091
21.0	3600.0	0.078
22.0	3600.0	0.069
23.0	3600.0	0.060
24.0	3600.0	0.054
25.0	3600.0	0.048



**Fig. 10: Aerogeneratore Siemens SWT130 3.6 MW**

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	22 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

## 5 APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD

### 5.1 Il modello digitale del terreno

Lo studio delle caratteristiche eoliche del sito è stato affrontato con un modello CFD che, a fronte di un dominio di calcolo impostato utilizzando i dati di orografia relativi ad un DTM (Digital Terrain Model) con passo di 20 m, fornisce informazioni sul comportamento del vento nei vari settori di provenienza, nonché i profili verticali della velocità orizzontale nei punti più significativi, quali anemometri e/o aerogeneratori. Di seguito è riportato il dominio di calcolo.

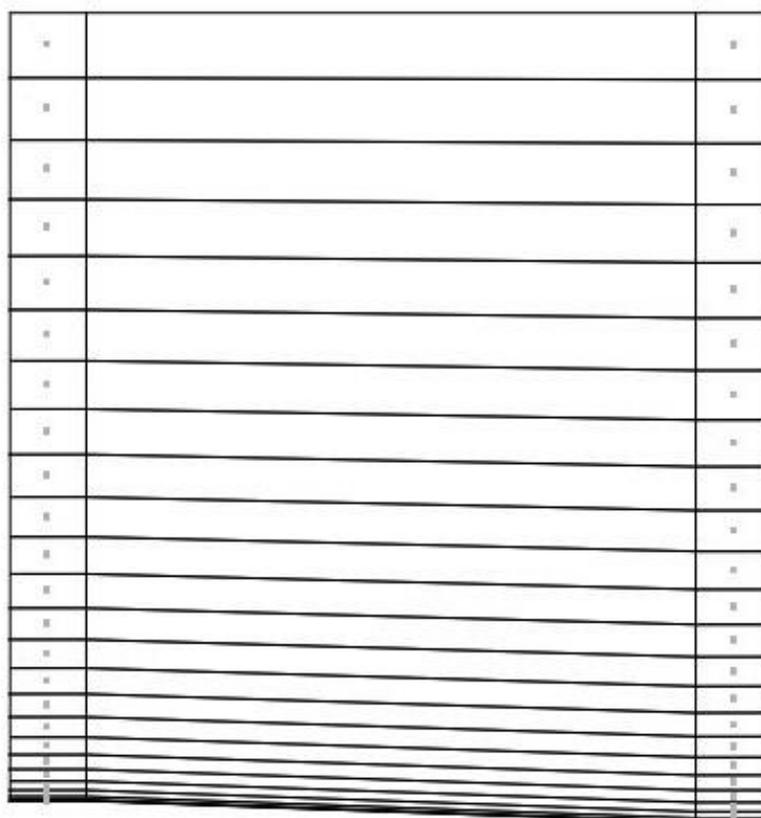


	x	y	z	total
Grid spacing (m)	40.0	40.0	Variable	-
Number of cells	125	125	25	409375

**Fig. 11:** Mesh orizzontale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	23 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

Di seguito invece la discretizzazione verticale del dominio di calcolo e relativa distanza dal terreno dei primi dieci nodi



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z-dist. max (m)	2.5	10.6	45.7	128.7	259.6	438.5	665.3	940.1	1262.7	1633.3
z-dist. min (m)	2.5	10.7	46.8	132.1	266.7	450.5	683.6	965.9	1297.5	1678.4

**Fig. 12:** Discretizzazione verticale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	24 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

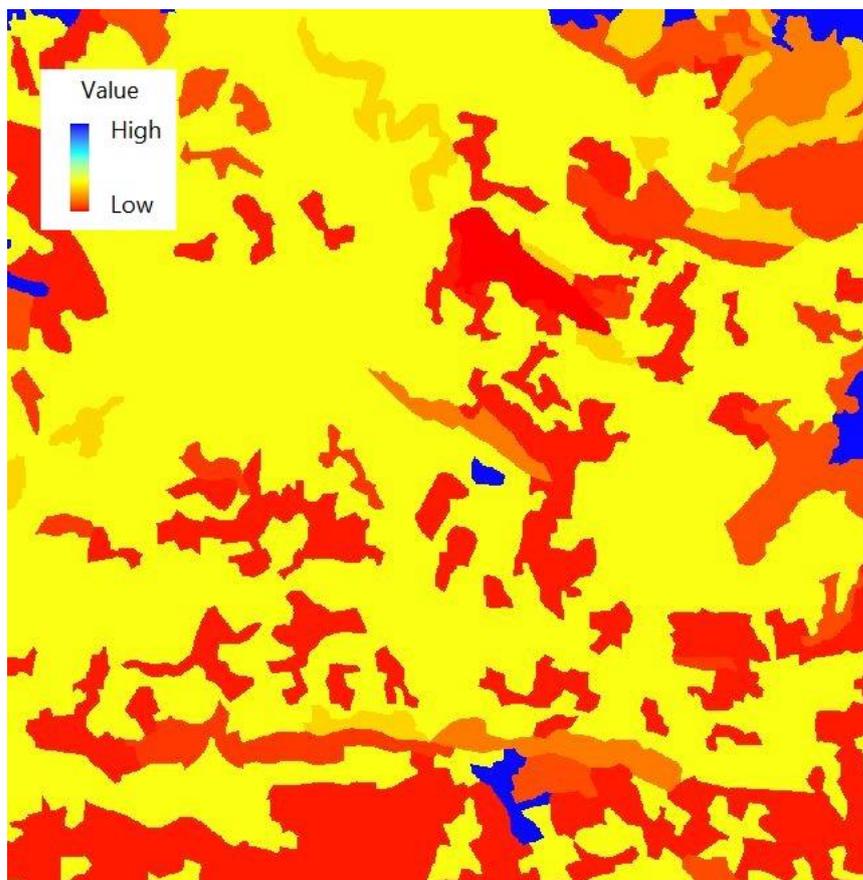
## 5.2 La rugosità

La lunghezza di rugosità ( $z_0$ ) è il parametro che caratterizza la superficie su cui spira il vento, maggiore è il suo valore maggiori saranno le asperità del terreno ed i disturbi creati dal suolo al flusso ventoso.

Fisicamente  $z_0$  può essere immaginata come la dimensione del vortice turbolento che viene creato dall'interazione del vento con il suolo, per cui si tratta di una grandezza in grado di intervenire nella modifica della distribuzione verticale della velocità del vento.

Il valore di  $z_0$  è stato standardizzato in base alle tipologie di terreno (categorie di riferimento) che si possono presentare nella realtà ed è riportato in diverse tipologie di classificazioni.

In questo caso, in particolare, si dispone di mappe di rugosità estrapolate da CLC (Corine Land Cover), che si sovrappongono ai DTM indicati in precedenza, in modo da coprire tutto il dominio.



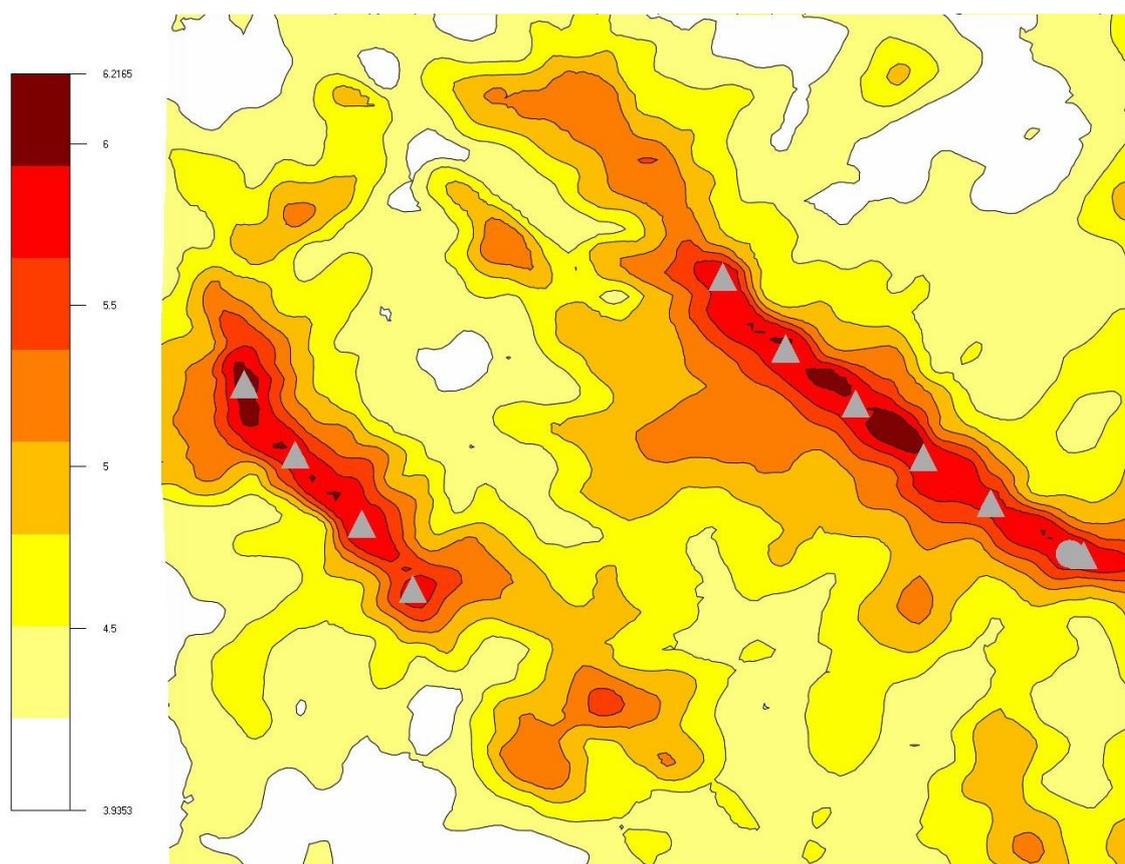
**Fig. 13:** Mappa di rugosità

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	PARTINICO-MONREALE (PA) Stima della Producibilità Energetica del impianto eolico ripotenziato	25 di 37
PAR	ENG	REL	0026	1		

### 5.3 La risorsa eolica

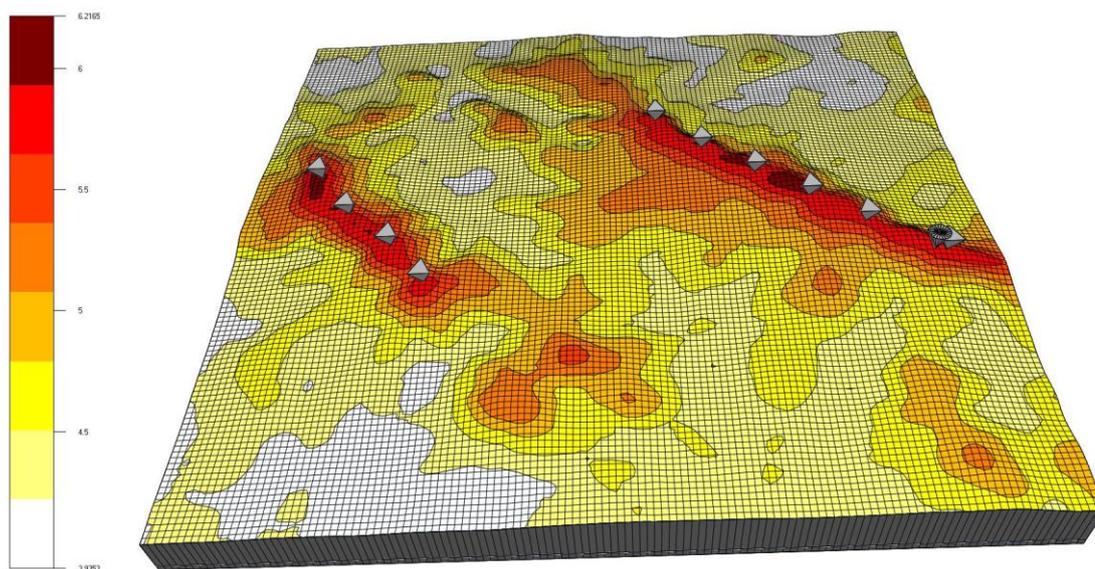
Il calcolo CFD è stato effettuato sui 12 settori di direzione impostando una velocità di 10 m/s come vento geostrofico al di sopra dello strato limite; le rilevazioni anemometriche sono state poi utilizzate per scalare il campo di moto del vento e conseguentemente calcolare la mappa della ventosità media e la produzione attesa dalle singole turbine eoliche.

Di seguito si riporta la mappa di ventosità relativa all'area d'impianto, calcolata a 82 m s.l.s., cioè a quota mozzo della configurazione della Vestas V136.



**Fig. 14:** Mappa di ventosità a 82m s.l.s

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	26 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		



**Fig. 15:** Mappa 3D di ventosità a 82m s.l.s.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	27 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

#### 5.4 Risultati del modello

A questo punto sono noti tutti gli elementi per avere una prima stima della producibilità energetica prevista per l'aerogeneratore che rappresenta la media dell'impianto, risultante dalla somma dei prodotti tra il numero di ore/anno e la potenza certificata per ogni bin di velocità del vento:

	<b>V136 (Singola turbina)</b>	<b>V136 (Intero Parco)</b>
Produzione media <b>lorda</b> attesa (MWh/anno)	10461	104614
	<b>N131 (Singola turbina)</b>	<b>N131 (Intero Parco)</b>
Produzione media <b>lorda</b> attesa (MWh/anno)	9430	94296
	<b>SWT130 (Singola turbina)</b>	<b>SWT130 (Intero Parco)</b>
Produzione media <b>lorda</b> attesa (MWh/anno)	9168	91676

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	28 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

E' possibile esprimere lo stesso valore sotto forma di producibilità lorda specifica, ovvero riferita ad ogni MW installato:

$$prod_{lorda\_specifica} = \frac{prod_{lorda\_WTG}}{Pot_{nom\_WTG}}$$

	<b>V136</b>
Potenza unitaria (MW)	4.20
Producibilità <b>lorda</b> specifica attesa (MWh/anno per MW installato)	<b>2491</b>

	<b>N131</b>
Potenza unitaria (MW)	3.60
Producibilità <b>lorda</b> specifica attesa (MWh/anno per MW installato)	<b>2619</b>

	<b>SWT130</b>
Potenza unitaria (MW)	3.60
Producibilità <b>lorda</b> specifica attesa (MWh/anno per MW installato)	<b>2547</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	29 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

Le perdite per effetto scia sono calcolate dal software CFD. In questo caso si è preferito utilizzare il modello di Jensen, che è uno dei modelli di calcolo delle scie implementati.

<b>V136</b>					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-PAR01	5,79	10377	5,77	10283	0,9%
R-PAR02	5,88	10735	5,82	10515	2,0%
R-PAR03	5,94	10993	5,89	10812	1,6%
R-PAR04	5,72	10240	5,65	10002	2,3%
R-PAR05	5,76	10330	5,68	10089	2,3%
R-MR01	5,77	10420	5,73	10261	1,5%
R-MR02	5,76	10291	5,71	10109	1,8%
R-MR03	5,68	10150	5,62	9990	1,6%
R-MR04	5,84	10783	5,81	10669	1,1%
R-MR05	5,74	10295	5,7	10150	1,4%
<b>Media</b>	<b>5,79</b>	<b>10461</b>	<b>5,74</b>	<b>10288</b>	<b>1,7%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	30 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

<b>N131</b>					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-ML01	5,8	9337	5,77	9249	0,9%
R-ML02	5,89	9674	5,83	9471	2,1%
R-ML03	5,94	9891	5,89	9725	1,7%
R-ML04	5,73	9245	5,65	9021	2,4%
R-ML05	5,76	9323	5,69	9096	2,4%
R-ML06	5,78	9398	5,74	9255	1,5%
R-ML07	5,77	9298	5,72	9127	1,8%
R-ML08	5,68	9152	5,63	8999	1,7%
R-ML09	5,85	9689	5,81	9584	1,1%
R-ML10	5,74	9290	5,71	9156	1,4%
<b>Media</b>	<b>5,79</b>	<b>9430</b>	<b>5,74</b>	<b>9268</b>	<b>1,7%</b>

<b>SWT130</b>					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-ML01	5,80	9084	5,78	9002	0,9%
R-ML02	5,89	9399	5,83	9196	2,2%
R-ML03	5,95	9611	5,89	9452	1,6%
R-ML04	5,74	8979	5,66	8754	2,5%
R-ML05	5,77	9056	5,69	8835	2,4%
R-ML06	5,79	9143	5,74	9000	1,6%
R-ML07	5,77	9039	5,72	8871	1,9%
R-ML08	5,69	8908	5,64	8755	1,7%
R-ML09	5,85	9439	5,82	9336	1,1%
R-ML10	5,75	9018	5,71	8885	1,5%
<b>Media</b>	<b>5,8</b>	<b>9168</b>	<b>5,75</b>	<b>9009</b>	<b>1,7%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	31 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

## 6 ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE

L'output del modello, in termini di energia annua producibile, deve essere decurtato di tutte le perdite esterne, al fine di poter determinare la producibilità annua netta, meglio nota come P50.

Le perdite esterne, oltre alle perdite per effetto scia di cui si è già parlato in precedenza, vengono suddivise in:

	<b>V136</b>
Perdite per effetto scia	1,66%
Perdite per mancata disponibilità di sistema (WTG + BOS) dell'impianto	3,00%
Perdite elettriche (cavidotto MT – consegna in AT)	3,24%
Perdite varie (basate sull'esperienza, in funzione dell'indice di turbolenza del vento)	1,50%
Perdite varie (basate sull'esperienza delle condizioni climatiche)	0,20%
Perdite dovute al rumore	2,00%
Totale perdite escluso scie	9,58%
Totale perdite	11,08%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	32 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

	<b>N131</b>
Perdite per effetto scia	1,71%
Perdite per mancata disponibilità di sistema (WTG + BOS) dell'impianto	3,00%
Perdite elettriche (cavidotto MT – consegna in AT)	3,24%
Perdite varie (basate sull'esperienza, in funzione dell'indice di turbolenza del vento)	1,50%
Perdite varie (basate sull'esperienza delle condizioni climatiche)	0,20%
Perdite dovute al rumore	2,00%
Totale perdite escluso scie	9,58%
Totale perdite	11,13%

	<b>SWT130</b>
Perdite per effetto scia	1,74%
Perdite per mancata disponibilità di sistema (WTG + BOS) dell'impianto	3,00%
Perdite elettriche (cavidotto MT – consegna in AT)	3,24%
Perdite varie (basate sull'esperienza, in funzione dell'indice di turbolenza del vento)	1,50%
Perdite varie (basate sull'esperienza delle condizioni climatiche)	0,20%
Perdite dovute al rumore	2,00%
Totale perdite escluso scie	9,58%
Totale perdite	11,15%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	33 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

La produzione netta attesa, ovvero quella che viene ritenuta più probabile, risulta quindi pari a:

	<b>V136 (Singola turbina)</b>	<b>V136 (Intero Parco)</b>
Produzione netta WTG P50 (MWh/anno)	9302	93023

	<b>N131 (Singola turbina)</b>	<b>N131 (Intero Parco)</b>
Produzione netta WTG P50 (MWh/anno)	8380	83803

	<b>SWT130 (Singola turbina)</b>	<b>SWT130 (Intero Parco)</b>
Produzione netta WTG P50 (MWh/anno)	8145	81454

Da cui risulta il valore della producibilità netta P50 specifica per ogni MW installato:

$$Prod_{netta\_specifica} = \frac{Prod_{netta\_WTG}}{Pot_{nom\_WTG}}$$

V136	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-PAR01	5,79	2214
R-PAR02	5,88	2264
R-PAR03	5,94	2328
R-PAR04	5,72	2153
R-PAR05	5,76	2172
R-MR01	5,77	2209
R-MR02	5,76	2176
R-MR03	5,68	2151
R-MR04	5,84	2297
R-MR05	5,74	2185
<b>Media</b>	<b>5,79</b>	<b>2215</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	34 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

N131	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-PAR01	5,80	2323
R-PAR02	5,89	2379
R-PAR03	5,94	2443
R-PAR04	5,73	2266
R-PAR05	5,76	2285
R-MR01	5,78	2325
R-MR02	5,77	2292
R-MR03	5,68	2260
R-MR04	5,85	2407
R-MR05	5,74	2300
<b>Media</b>	<b>5,79</b>	<b>2328</b>

SWT130	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-PAR01	5,80	2261
R-PAR02	5,89	2310
R-PAR03	5,95	2374
R-PAR04	5,74	2199
R-PAR05	5,77	2219
R-MR01	5,79	2260
R-MR02	5,77	2228
R-MR03	5,69	2199
R-MR04	5,85	2345
R-MR05	5,75	2232
<b>Media</b>	<b>5,80</b>	<b>2263</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	35 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

Moltiplicando la produzione netta del WTG per il numero di WTG dell'impianto si ottiene la stima P50 della produzione netta dell'impianto:

$$Prod_{netta\_tot} = Prod_{netta\_WTG} \times N_{WTG}$$

	<b>V136</b>
Numero aerogeneratori	10
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	93023

	<b>N131</b>
Numero aerogeneratori	10
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	83803

	<b>SWT130</b>
Numero aerogeneratori	10
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	81454

Una volta ottenuto il valore P50, rappresentativo di tutto l'impianto, vengono individuati i relativi valori di producibilità P65.2 P75 e P90, a valle di una specifica analisi di incertezza (o analisi di confidenza).

Questo tipo di analisi, individua tre differenti macro-aree, per ognuna delle quali viene determinata la relativa incertezza di calcolo. Si riportano i valori per le diverse configurazioni:

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	36 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

	<b>V136</b>
incertezza sulla storicizzazione del sito	4,6%
incertezza sul processo di micrositing	10,8%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5,0%
<b>Incetenza complessiva</b>	<b>12,8%</b>

	<b>N131</b>
incertezza sulla storicizzazione del sito	4,6%
incertezza sul processo di micrositing	11,0%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5,0%
<b>Incetenza complessiva</b>	<b>13,0%</b>

	<b>SWT130</b>
incertezza sulla storicizzazione del sito	4,6%
incertezza sul processo di micrositing	11,1%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5,0%
<b>Incetenza complessiva</b>	<b>13,0%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>PARTINICO-MONREALE (PA)</b> <b>Stima della Producibilità Energetica del</b> <b>impianto eolico ripotenziato</b>	37 di 37
<b>PAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0026</b>	<b>1</b>		

Tale valore è ottenuto come somma statistica delle diverse componenti.  
Considerando proprio l'incertezza complessiva ottenuta, si possono infine determinare, a partire dal P50, i percentili P62.5, P75 e P90 della gaussiana.

	<b>V136</b>
P50 (ore equivalenti)	2215
P62.5 (ore equivalenti)	2124
P75 (ore equivalenti)	2023
P90 (ore equivalenti)	1851

	<b>N131</b>
P50 (ore equivalenti)	2328
P62.5 (ore equivalenti)	2232
P75 (ore equivalenti)	2124
P90 (ore equivalenti)	1941

	<b>SWT130</b>
P50 (ore equivalenti)	2263
P62.5 (ore equivalenti)	2169
P75 (ore equivalenti)	2064
P90 (ore equivalenti)	1885