

# REGIONE SICILIA

Provincia di Siracusa

COMUNE DI CARLENTINI

PROGETTO

## POTENZIAMENTO PARCO EOLICO CARLENTINI



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE

**ERG Wind 2000**

Una società del Gruppo  ERG

**ERG Wind Sicilia 3**

Una società del Gruppo  ERG

SOCIETA' DI PROGETTAZIONE:



**UTIP**  
s.r.l.

Viale Garrone, 37 - Loc. Città Giardino - 96010 Melilli (SR)  
Tel.: 0931 744764/744003 - Fax: 0931 744722  
info@utipsrl.it - www.utipsrl.it

CONSULENZA SPECIALISTICA:



Sede Legale: Via Sabotino, 8 - 96013 Carlentini (SR)  
Tel.: 0931.340985 - 335.8259689  
info@antexgroup.it - www.antexgroup.it

TECNICO PROFESSIONISTA RESP. DEL SERVIZIO:



OGGETTO DELL'ELABORATO:

## VALUTAZIONE RISORSA EOLICA E ANALISI DI PRODUCIBILITA'

NOME FILE:	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO				
					IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.
CAR-ENG-REL-018_00.docx	Marzo 2019	/	1/14	A4	CAR	ENG	REL	018	00

ERG Wind 2000 S.r.l. e ERG Wind Sicilia 3 S.r.l. si riservano 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 CARLENTINI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA E ANALISI DI PRODUCIBILITA'	2
<b>CAR</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>018</b>	<b>00</b>		

Storia delle revisioni del progetto:

Rev.	Data	Descrizione revisione	Redatto	Controllato	Approvato
00	marzo 2019	Emissione per Enti Esterni	BAUDINO	CORBO	DEPERU



## CARLENTINI 1 & 2 (SR)

### **STUDIO ANEMOLOGICO** *Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità*

0	26/03/2019	Emissione per Enti Esterni	BAUDINO	CORBO	DEPERU
<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	CRL-ENG-REL-0018-00	1 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	<b>0</b>		

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	2 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

## INDICE

<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>3</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
<b>2 RAPPRESENTAZIONE DEL SITO</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Descrizione del sito</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 Layout</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3 Aerogeneratori adottati</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4 Allacciamento alla rete elettrica</b> .....	<b>13</b>
<b>3 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1 Strumenti utilizzati</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2 Raccolta dei dati e validazione</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3 Analisi anemologica e statistica dei dati</b> .....	<b>18</b>
<b>4 CURVA DI POTENZA</b> .....	<b>26</b>
<b>5 APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD</b> .....	<b>29</b>
<b>5.1 Il modello digitale del terreno</b> .....	<b>29</b>
<b>5.2 La rugosità</b> .....	<b>33</b>
<b>5.3 La risorsa eolica</b> .....	<b>34</b>
<b>5.4 Risultati del modello</b> .....	<b>37</b>
<b>6 ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE</b> .....	<b>41</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CARLENTINI (SR) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	3 di 48
CRL	ENG	REL	0018	0		

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Inquadramento del sito.....	6
Figura 2: Inquadramento del sito con suddivisione in quattro aree (Carlentini I Nord-Est in blu, Carlentini I Sud-Ovest in rosso, Carlentini II Ovest in Giallo, Carlentini II Est in verde) .....	7
Figura 3: Inquadramento del sito, Carlentini I Nord-Est, Vista da Sud-Est.....	7
Figura 4: Inquadramento del sito, Carlentini I, vista da Nord-Ovest.....	8
Figura 5: Inquadramento del sito, Carlentini II Ovest, vista da Est .....	8
Figura 6: Inquadramento del sito, Carlentini II Est, vista da Est.....	8
Figura 7: Stazioni di misura in sito, Carlentini Nord-Est.....	14
Figura 8: Stazioni di misura in sito: Carlentini Sud-Ovest.....	15
Figura 9: Stazioni di misura in sito: Carlentini Sud-Est .....	16
Figura 10: Validazione anemometro .....	17
Figura 11: Profilo giornaliero di velocità - CRL80 .....	18
Figura 12: Profilo mensile di velocità - CARL80 .....	18
Figura 13: Profilo verticale di velocità CARL80 (wind shear).....	19
Figura 14: Tabella di frequenze CRL03-50m.....	21
Figura 15: Tabella di frequenze CRL05-50m.....	22
Figura 16: Tabella di frequenze CRL09-55m.....	23
Figura 17: Tabella di frequenze CRL80 - 55m.....	24
Figura 18: Aerogeneratore Vestas V150 4.2 .....	26
Figura 19: Aerogeneratore Nordex N149 4.8 MW .....	27
Figura 20: Aerogeneratore GE158 5.5 MW.....	28
Figura 21: Mesh orizzontale del dominio di calcolo (area Sud Est) .....	29
Figura 22: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo (area Sud Est) .....	30
Figura 23: Mappa 3D del sito di Carlentini Nord.....	31
Figura 24: Mappa 3D area del sito di Carlentini Sud Ovest.....	31
Figura 25: Mappa 3D aerea del sito di Carlentini Sud Est.....	32
Figura 26: Mappa di rugosità di Carlentini.....	33
Figura 27: Mappa di ventosità a 50 m s.l.s., Carlentini Nord .....	34
Figura 28: Mappa di ventosità a 101 m s.l.s., Carlentini Sud Ovest.....	35
Figura 29: Mappa di ventosità a 101 m s.l.s., Carlentini Sud Est.....	36

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	4 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

## 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 studiare la producibilità di un impianto esistente che viene ripotenziato grazie all'installazione di macchine innovative con potenza unitaria maggiori 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 (il software), 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>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	5 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

## 2 RAPPRESENTAZIONE DEL SITO

### 2.1 Descrizione del sito

L'impianto esistente è situato in provincia di Siracusa e si sviluppa interamente sul territorio del comune di Carlentini. L'impianto attualmente è costituito da 57 macchine, 28 Gamesa G58 da 850 kW e 29 Vestas V52 da 850 kW, per una potenza installata totale di 48,45 MW.

L'impianto inoltre è suddiviso in due unità produttive: Carlentini I (area blu e rossa in Figura 2) e Carlentini II (area gialla e verde in Figura 2)

Il nuovo layout ripotenziato si sviluppa nell'area del parco già esistente e prevede un numero totale di 18 aereogeneratori multi-megawatt. Inoltre, saranno mantenuti in operazione 19 aerogeneratori Vestas V52, corrispondenti all'area Nord-Est di Carlentini I.

Il parco eolico è suddiviso geograficamente in quattro zone: Carlentini I è costituita da un'area produttiva locata a Nord-Est (Figura 3) ed una locata a Sud-Ovest (Figura 4). Carlentini II invece è costituita da un'area produttiva locata a Ovest (Figura 5), nei pressi dell'area Sud-Ovest di Carlentini II, ed una seconda area locata ad Est (Figura 6). L'impianto si estende su un'area di circa 8 km in direzione Nord-Est – Sud-Ovest e di circa 4,5 km in direzione Nord-Ovest – Sud-Est.

L'area Nord-Est di Carlentini I si sviluppa su tre crinali distinti, che si estendono in direzione Nord-Est – Sud-Ovest, situati a 6 km di distanza dalla città Carlentini. L'area Sud-Ovest di Carlentini I si estende su un singolo crinale, in direzione Sud-Ovest – Nord-Est, distante 850 m dalla cittadina di Pedagaggi. L'area d'impianto Ovest di Carlentini II si estende su un singolo crinale, in direzione Nord-Sud, distante 1400 metri dal comune di Pedagaggi. L'area Est di Carlentini copre un'area estesa costituita da tre crinali paralleli, che si sviluppano in direzione Nord-Est – Sud-Ovest, a 3,5 km di distanza da Sortino.

Alcune parti dell'area d'impianto sono caratterizzate dalla presenza di zone boschive costituite prevalentemente da alberi di 5 metri circa di altezza.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	6 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		



Figura 1: Inquadramento del sito

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	7 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	<b>0</b>		

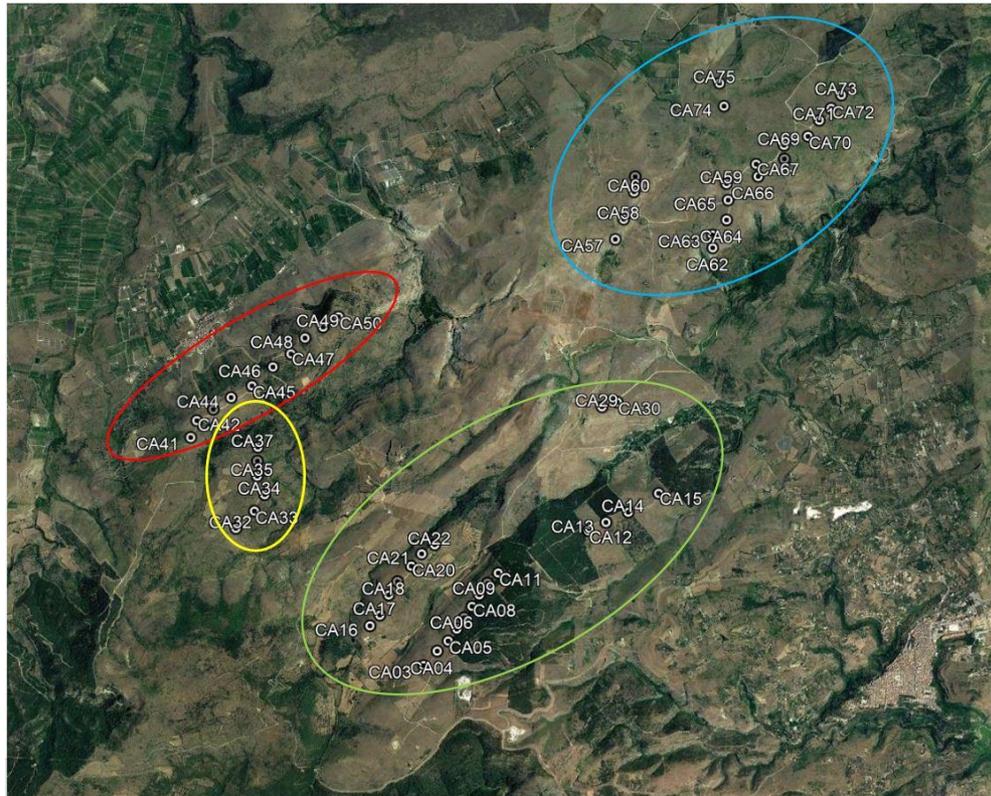


Figura 2: Inquadramento del sito con suddivisione in quattro aree (Carlentini I Nord-Est in blu, Carlentini I Sud-Ovest in rosso, Carlentini II Ovest in Giallo, Carlentini II Est in verde)



Figura 3: Inquadramento del sito, Carlentini I Nord-Est, Vista da Sud-Est

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	8 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		



*Figura 4: Inquadramento del sito, Carlentini I, vista da Nord-Ovest*



*Figura 5: Inquadramento del sito, Carlentini II Ovest, vista da Est*



*Figura 6: Inquadramento del sito, Carlentini II Est, vista da Est*

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	9 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

## 2.2 Layout

Il nuovo layout di impianto è composto da N. 18 aerogeneratori, dislocati all'interno di territori comunali di Carlentini. Inoltre, i 19 aerogeneratori Vestas V52 localizzati nell'area Nord-Est dell'impianto saranno mantenuti in funzione.

Gli aerogeneratori (esistenti e anche quelli futuri) sono disposti in 4 aree separate come mostrato in Figura 2.

Le coordinate e le quote relative sono:

Sigla	Coordinate UTM WGS84 F33		Quota (m)
	Est	Nord	
WTG	E	N	
R-CA01	496873	4112386	645.0
R-CA02	497229	4112747	643.3
R-CA03	497503	4113173	626.7
R-CA04	497834	4113547	599.1
R-CA05	498819	4113995	552.9
R-CA06	499270	4114200	546.5
R-CA07	499712	4114410	517.1
R-CA08	498416	4114853	507.1
R-CA09	498655	4115297	536.6
R-CA10	499120	4115500	493.8
R-CA11	499355	4115891	450.7
R-CA12	493956	4114171	596
R-CA13	494183	4114600	570.4
R-CA14	494455	4115214	537.8
R-CA15	494853	4115474	525
R-CA16	495306	4115798	542.5
R-CA17	495646	4116123	570.0
R-CA18	496045	4116381	555
CA57	499130	4117260	500.1
CA58	499224	4117485	517.9
CA59	500379	4117888	494.6
CA60	499341	4117795	495
CA61	499357	4117971	484.1
CA62	500226	4117169	470.3
CA63	500221	4117313	478.6
CA64	500380	4117481	493.5
CA65	500399	4117706	486.7
CA66	500731	4117966	518.1
CA67	500710	4118106	514
CA68	501025	4118163	520.6
CA69	501024	4118317	518.3
CA70	501293	4118419	510.4
CA71	501423	4118602	500.3
CA72	501558	4118740	493.4
CA73	501682	4118898	468.7
CA74	500359	4118772	463.7
CA75	500311	4119034	464.3

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	10 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

### 2.3 Aerogeneratori adottati

Per la stima di producibilità energetica di Carlentini 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 ( $\rho=1.150 \text{ kg/m}^3$ ).

Di seguito la curva di potenza del primo modello analizzato, Vestas V150, fornita dal costruttore alla densità media di sito:

<b>Modello</b>	<b>V150 4.2</b>
<b>Produttore</b>	Vestas
<b>Potenza (MW)</b>	4.2
<b>Diametro (m)</b>	150
<b>Altezza del mozzo (m)</b>	105

Velocità del vento (m/s)	V150 [ $\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ] (kW)
3	73
4	265
5	557
6	995
7	1603
8	2394
9	3292
10	3951
11	4180
12	4200
13	4200
14	4200
15	4200
16	4200
17	4200
18	4200
19	4200
20	4200
21	3870
22	2745
23	1805
24	1283

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	11 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

Il secondo aerogeneratore preso in esame è Nordex N149 la cui curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito ( $\rho=1.150 \text{ kg/m}^3$ ) per l'aerogeneratore è la seguente:

<b>Modello</b>	<b>N149</b>
<b>Produttore</b>	Nordex
<b>Potenza (MW)</b>	4.8
<b>Diametro (m)</b>	149
<b>Altezza del mozzo (m)</b>	105

Velocità del vento (m/s)	N149 [ $\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$ ] (kW)
3	26
4	229
5	545
6	987
7	1586
8	2373
9	3343
10	4199
11	4660
12	4800
13	4800
14	4800
15	4800
16	4800
17	4800
18	4800
19	4800
20	4655
21	4307
22	3951
23	3600
24	3245
25	2885

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	12 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

Il terzo generato considerato è la GE158, la cui curva di potenza è riportata di seguito alla densità media di sito.

<b>Modello</b>	<b>GE 158 5.5</b>
<b>Produttore</b>	General Electric
<b>Potenza (MW)</b>	5.5
<b>Diametro (m)</b>	158
<b>Altezza del mozzo (m)</b>	101

Velocità del vento (m/s)	GE158 [ $\rho=1.140 \text{ m}^3/\text{kg}$ ] (kW)
3	66
4	271
5	593
6	1065
7	1721
8	2590
9	3612
10	4562
11	5265
12	5500
13	5500
14	5500
15	5500
16	5500
17	5500
18	5500
19	5500
20	5500
21	5495
22	5293
23	4828
24	4493
25	4366

Per un ulteriore approfondimento delle curve utilizzate nel software con cui è stata effettuata l'analisi fluidodinamica si rimanda al capitolo 5.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	13 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

## 2.4 Allacciamento alla rete elettrica

L'impianto attuale è connesso alla adiacente stazione elettrica di proprietà Terna, situata nel Comune di Carlentini provincia di Siracusa.

L'ipotesi di progetto prevede il collegamento in AT, comportando opportune modifiche.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	14 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

### 3 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

Data la vastità del sito, per esigenze tecniche relative alla costruzione del modello fluidodinamico il sito è stato diviso in tre parti: Carlentini Nord-Est, Carlentini Sud-Ovest (ottenuta dall'unione di Carlentini I Sud-Ovest e Carlentini II Ovest) e Carlentini Sud-Est.

#### 3.1 Strumenti utilizzati

La campagna anemometrica è stata condotta in sito con 4 torri anemometriche. Ogni sotto-area è stata costruita in modo tale che ogni cluster abbia almeno una torre di misura

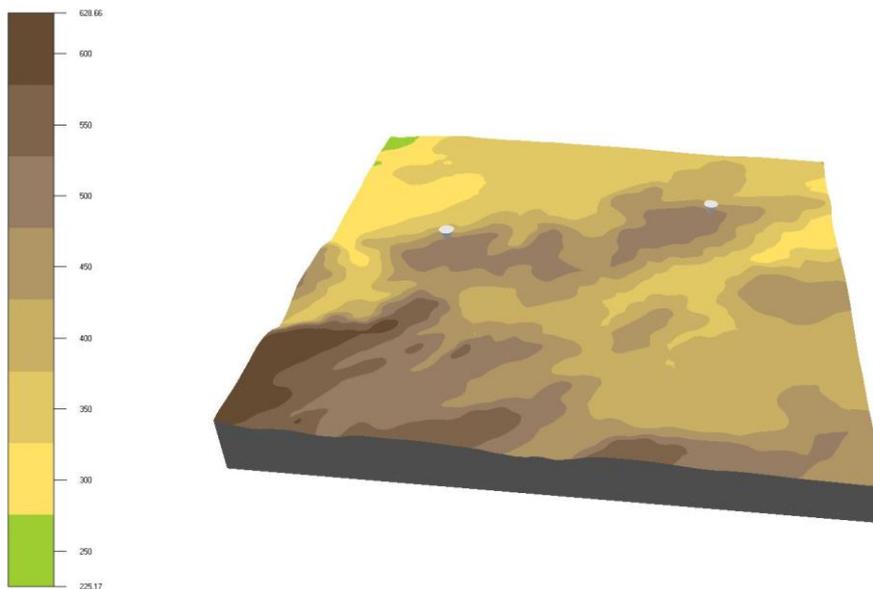
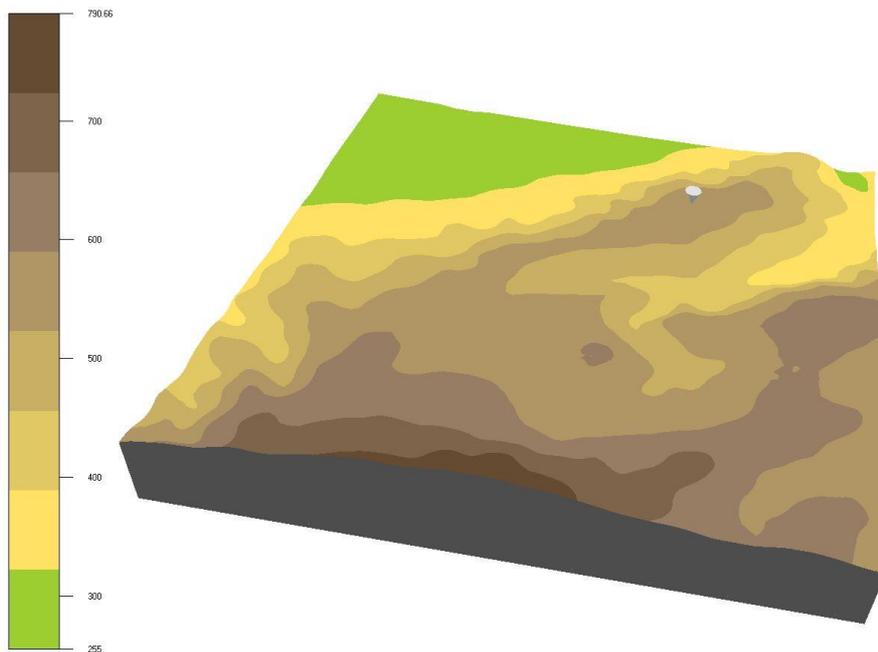


Figura 7: Stazioni di misura in sito, Carlentini Nord-Est

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	15 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		



*Figura 8: Stazioni di misura in sito: Carlentini Sud-Ovest*

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	16 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

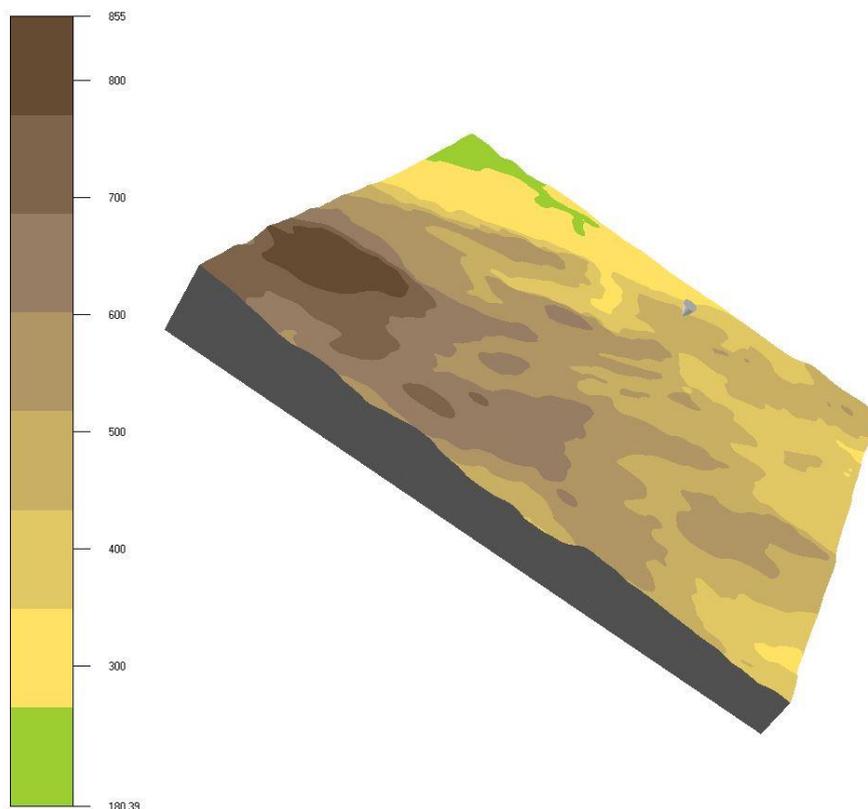


Figura 9: Stazioni di misura in sito: Carlentini Sud-Est

Stazione anemometrica	Coord est	Coord nord	Quota (m)	Altezza (m)	dal	al
CRL03	501508	4118661	500 mt	10	01/01/2008	02/09/2015
CRL05	495636	4116111	575 mt	10	01/01/2008	02/09/2015
CRL09	498006	4117479	506 mt	10	05/08/2009	02/09/2015
CRL80	498014	4117410	509 mt	80	15/05/2014	01/07/2017

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	17 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	<b>0</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. Si riporta, uno tra tutti, la validazione fatta per una torre.

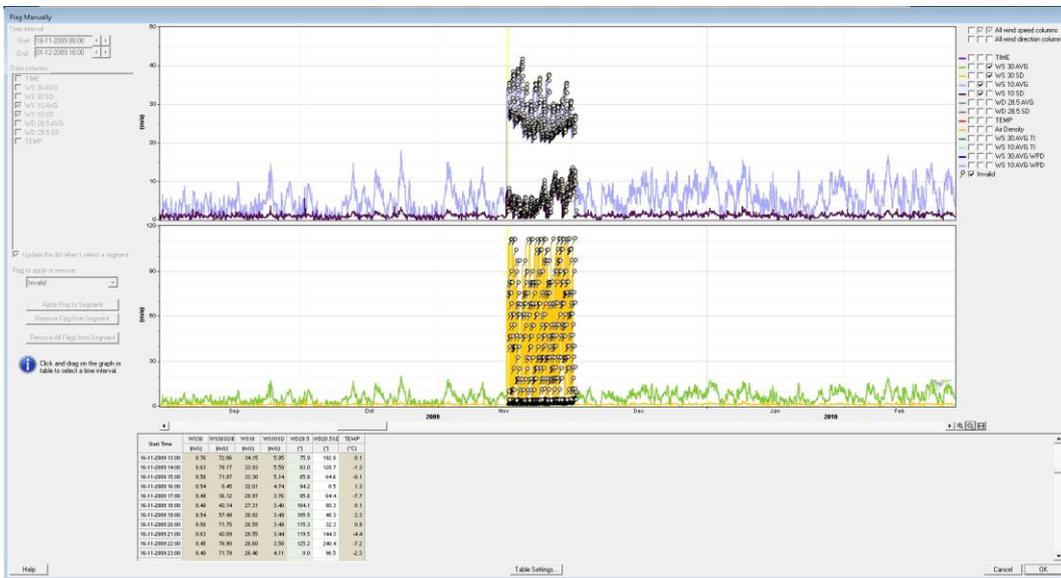


Figura 10: Validazione anemometro

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>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	18 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

### 3.3 Analisi anemologica e statistica dei dati

A seguito della validazione dei dati si possono stilare le statistiche sulle velocità medie di sito. Di seguito si riportano a titolo d'esempio i profili statistici relativi ad una delle quattro torri di misura (CRL80)

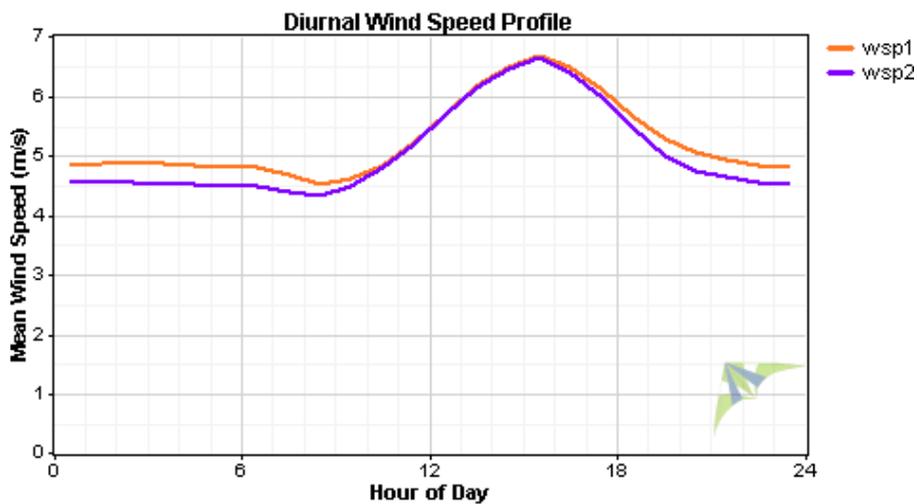


Figura 11: Profilo giornaliero di velocità - CRL80

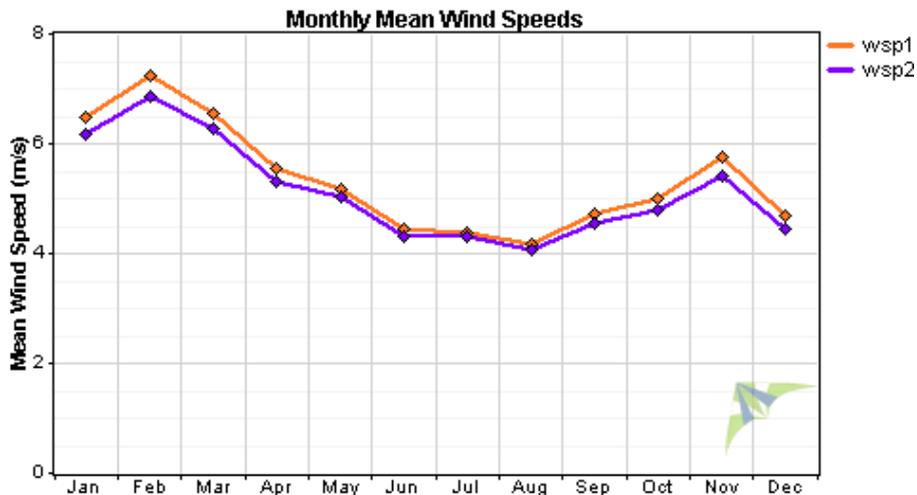


Figura 12: Profilo mensile di velocità - CARL80

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	19 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

Inoltre, partendo dalle velocità misurate, si procede all'estrapolazione del profilo verticale di velocità.

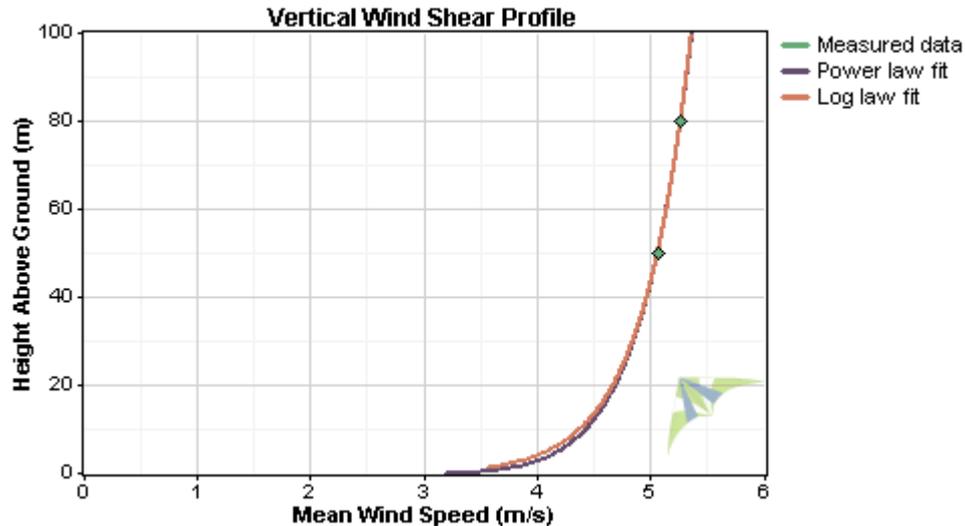


Figura 13: Profilo verticale di velocità CARL80 (wind shear)

da cui si può agevolmente ottenere 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 in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti (HH50):

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

Le formule sono indicate a titolo esemplificativo e devono essere adattate alle specificità della misura disponibile.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	20 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

Nel caso specifico di Carlentini, essendo disponibile un solo sensore di velocità a 10m per le tre torri anemometriche, (singola misura sulla verticale della torre anemometrica), la prima ipotesi di velocità a 50m è stata ottenuta stimando il valore del parametro  $\alpha$  (coefficiente di wind shear) in base all'orografia del sito in corrispondenza del punto di installazione della torre di misura.

Al fine di ridurre le incertezze di calcolo legate al processo di estrapolazione verticale della misura da quota anemometro ad altezza hub, è stato preso in considerazione anche il dato di energia da SCADA di impianto esistente.

A partire dal dato SCADA di energia estrapolato ai morsetti del generatore di turbina ad un'altezza di riferimento pari all'altezza mozzo delle V52, e delle G58, ovvero rispettivamente a 50m e a 55 m s.l.s., si è proceduto a determinare, sulla base dei dati storici di operation e quindi di tutti i tipi di downtime occorsi nel periodo oggetto di misura, la producibilità storica d'impianto, su base annuale.

In particolare, la serie storica di dati SCADA su base energia è stata rielaborata con la serie di dati di downtime (periodo: 2005-2016) per calcolare anno per anno la producibilità mensile e quindi definire il dato di producibilità annua storica.

Ci si è avvalsi di tale input in ambiente di modellazione CFD, approcciando in modo critico la precedente estrapolazione verticale della velocità, da quota misura fino all'altezza mozzo desiderata, disponendo questa volta di un riferimento noto in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti (V52 HH50 – G58 HH55).

A valle dell'applicazione di tale procedura di calcolo, è possibile determinare le tabelle di frequenza per bin di direzione e di velocità in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti e del punto di installazione di ogni torre anemometrica.

Si ottengono le seguenti statistiche di ventosità (climatologie):

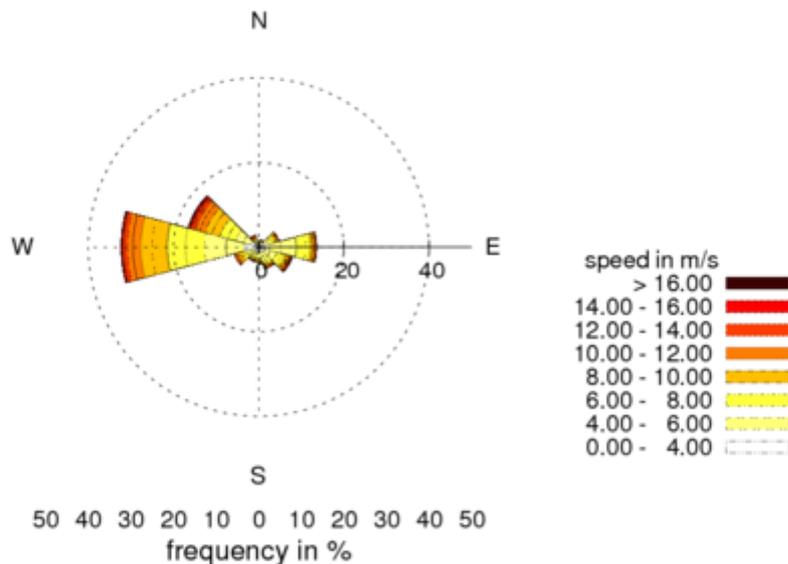
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	21 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

site name	CRL03_50		
filename	6227-CRL03_50		
measurement period	01.01.08 - 02.09.15	# records = 3407787	
position	x = 501508.0	y = 4118661.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.87	A = 6.20	average = 5.66

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull ( $k, A$ ) and average wind speed (m/s) of all sectors.

#### Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.35	1.54	1.54	1.91	1.58	1.49	1.56	1.67	2.20	2.28	2.29	1.96
A	3.49	4.05	5.27	5.10	5.68	5.22	4.55	5.13	6.53	6.76	7.70	7.21
freq	1.0	1.7	5.0	13.6	8.2	5.3	3.6	3.5	5.9	32.2	17.1	2.9
mean	3.24	3.77	4.96	4.72	5.40	5.03	4.37	4.81	5.74	6.08	6.79	6.18

Table 2. Weibull ( $k, A$ ), frequency (% related to all sectors) and average wind speed (m/s) versus sector.

Figura 14: Tabella di frequenze CRL03-50m

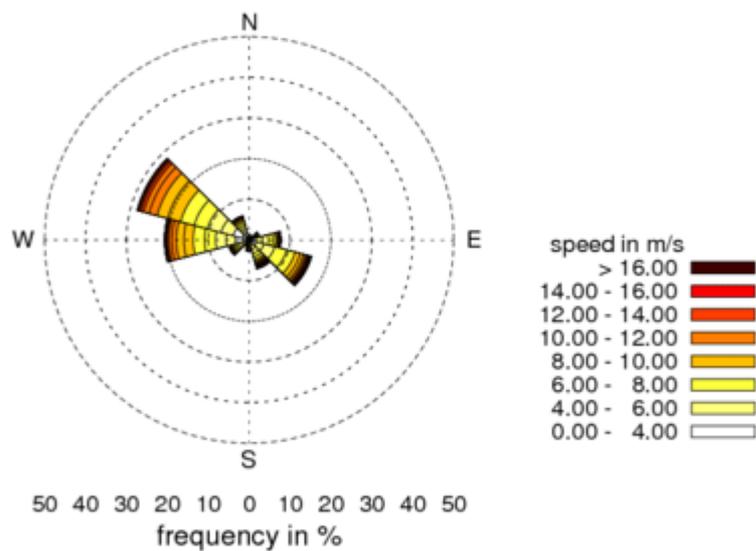
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	22 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

site name	CRL05_50		
filename	6228-CRL05_50		
measurement period	01.01.08 - 02.09.15	# records = 3037415	
position	x = 495638.0	y = 4116111.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.94	A = 6.46	average = 5.72

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull (k,A) and average wind speed (m/s) of all sectors.

#### Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.30	1.29	1.45	1.62	1.73	1.48	1.77	1.60	1.92	2.28	2.37	1.89
A	2.38	3.26	5.41	5.27	6.32	6.50	5.92	4.90	5.95	6.79	7.11	5.77
freq	1.2	1.0	2.6	7.8	15.7	7.3	2.7	1.7	5.1	20.6	28.3	6.1
mean	2.20	3.09	4.88	4.89	5.95	6.19	5.25	4.45	5.32	5.93	6.21	4.99

Table 2. Weibull (k,A), frequency (% related to all sectors) and average wind speed (m/s)

Figura 15: Tabella di frequenze CRL05-50m

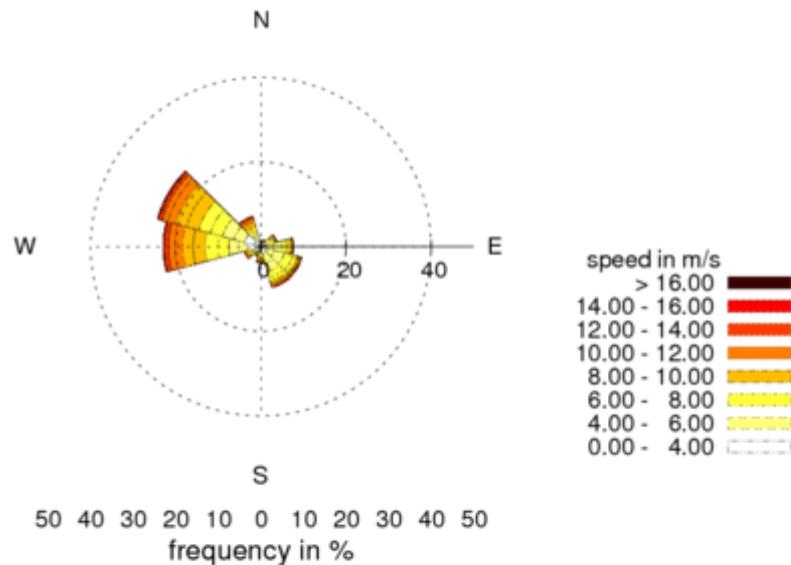
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	23 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

site name	CRL09_50		
filename	6229-CRL09_50		
measurement period	05.08.09 - 02.09.15	# records = 2039940	
position	x = 498005.0	y = 4117478.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.99	A = 6.34	average = 5.67

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull ( $k, A$ ) and average wind speed (m/s) of all sectors.

#### Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.05	1.41	1.23	2.04	2.24	1.68	1.84	1.46	1.98	2.66	2.46	2.07
A	2.81	3.80	4.89	5.17	5.40	5.21	6.42	5.47	6.25	7.41	7.11	6.88
freq	1.1	1.7	4.0	7.7	9.9	10.0	3.9	2.3	4.0	22.9	25.1	7.4
mean	2.90	3.65	5.02	4.76	4.90	4.97	5.77	5.22	5.42	6.44	6.19	5.88

Table 2. Weibull ( $k, A$ ), frequency (% related to all sectors) and average wind speed (m/s) versus sector.

Figura 16: Tabella di frequenze CRL09-55m

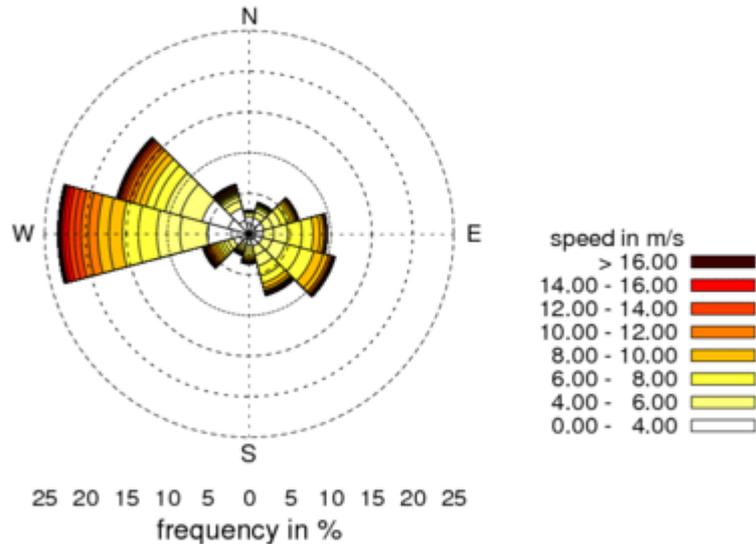
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	24 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

site name	Carlentini80_55		
filename	6390-Carlentini80_55		
measurement period	05.08.09 - 30.06.17	# records = 142540	
position	x = 498014.0	y = 4117410.0	z (agl) = 55.0
Weibull param., average speed	k = 1.51	A = 5.60	average = 5.15

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull ( $k, A$ ) and average wind speed (m/s) of all sectors.

#### Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.25	1.26	1.74	2.43	2.37	1.78	1.34	1.21	1.44	1.60	1.31	0.97
A	2.78	3.69	5.05	5.85	6.35	5.86	5.42	4.77	6.21	6.57	4.98	3.65
freq	2.9	4.0	6.3	9.5	10.8	7.8	3.6	2.8	5.9	23.3	16.7	6.3
mean	2.59	3.55	4.56	5.11	5.57	5.25	5.05	4.50	5.68	6.05	4.90	4.26

Table 2. Weibull ( $k, A$ ), frequency (% related to all sectors) and average wind speed (m/s) versus sector.

Figura 17: Tabella di frequenze CRL80 - 55m

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	25 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

Si procede quindi a rimodulare il calcolo del gradiente al suolo tenendo conto degli input sopra descritti, pervenendo alla stima delle climatologie in corrispondenza delle nuove altezze mozzo degli aerogeneratori oggetto di repowering (HH=105m e HH=114m).

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

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	26 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

#### 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. 511). Si ipotizza quindi un valore di densità dell'aria media pari a  $\rho = 1,150 \text{ kg/m}^3$ .

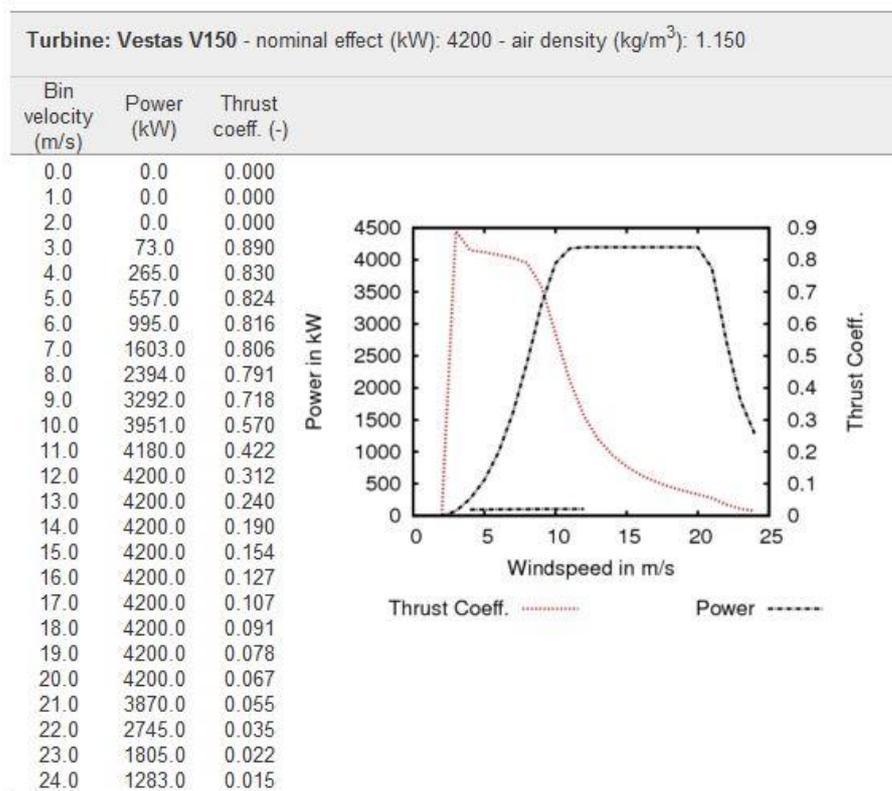


Figura 18: Aerogeneratore Vestas V150 4.2

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	27 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

Turbine: Nordex N149 - nominal effect (kW): 4800 - air density (kg/m <sup>3</sup> ): 1.150		
Bin velocity (m/s)	Power (kW)	Thrust coeff. (-)
0.0	0.0	0.000
0.5	0.0	0.000
1.0	0.0	0.000
1.5	0.0	0.000
2.0	0.0	0.000
2.5	0.0	0.000
3.0	26.0	0.827
3.5	112.0	0.826
4.0	229.0	0.817
4.5	373.0	0.808
5.0	545.0	0.800
5.5	748.0	0.794
6.0	987.0	0.791
6.5	1265.0	0.789
7.0	1586.0	0.788
7.5	1955.0	0.788
8.0	2373.0	0.783
8.5	2842.0	0.764
9.0	3343.0	0.728
9.5	3824.0	0.684
10.0	4199.0	0.635
10.5	4477.0	0.585
11.0	4660.0	0.535
11.5	4763.0	0.486
12.0	4800.0	0.438
12.5	4800.0	0.391
13.0	4800.0	0.347
13.5	4800.0	0.306
14.0	4800.0	0.271
14.5	4800.0	0.239
15.0	4800.0	0.214
15.5	4800.0	0.193
16.0	4800.0	0.174
16.5	4800.0	0.159
17.0	4800.0	0.146
17.5	4800.0	0.135
18.0	4800.0	0.126
18.5	4800.0	0.118
19.0	4800.0	0.111
19.5	4761.0	0.105
20.0	4655.0	0.101
20.5	4482.0	0.093
21.0	4307.0	0.085
21.5	4131.0	0.076
22.0	3951.0	0.068
22.5	3776.0	0.061
23.0	3600.0	0.055
23.5	3420.0	0.049
24.0	3245.0	0.044
24.5	3065.0	0.040
25.0	2885.0	0.036
25.5	2705.0	0.033

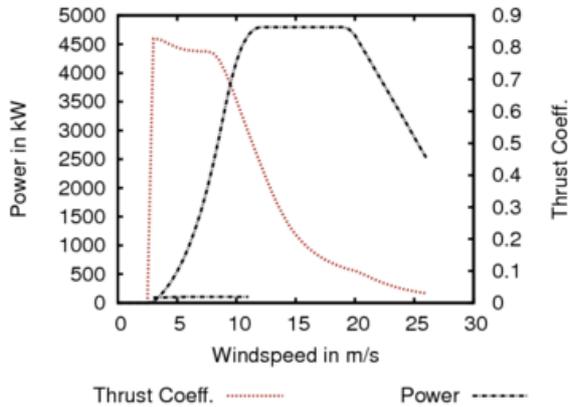


Figura 19: Aerogeneratore Nordex N149 4.8 MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	28 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

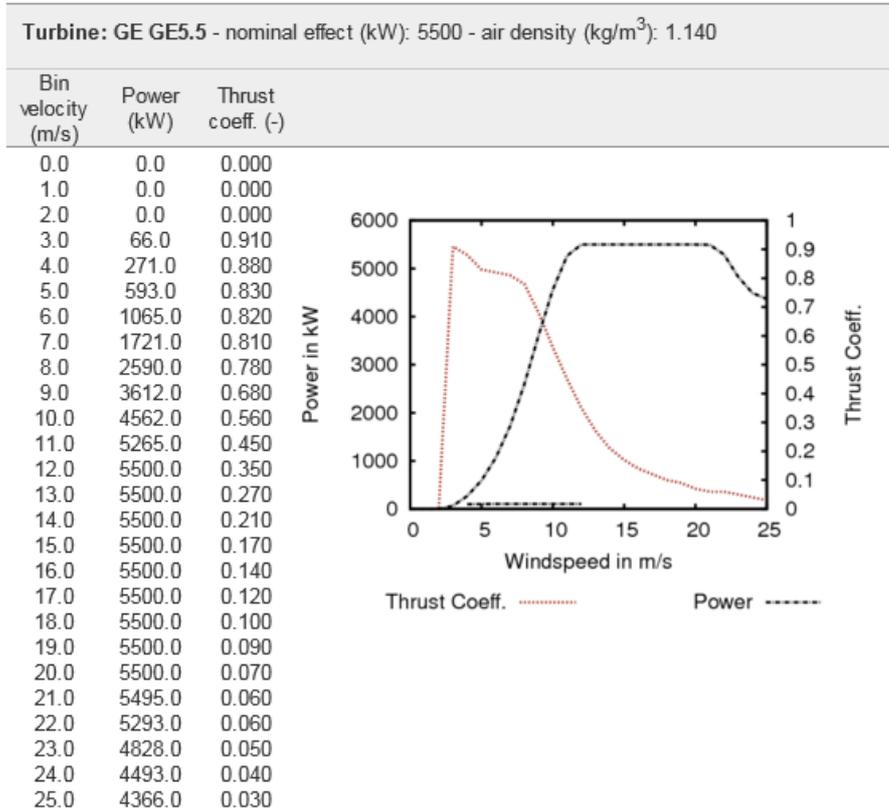


Figura 20: Aerogeneratore GE158 5.5 MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CARLENTINI (SR) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	29 di 48
CRL	ENG	REL	0018	0		

## 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.

Il DTM riportato di seguito è riferito al sito di Carlentini Sud-Est:

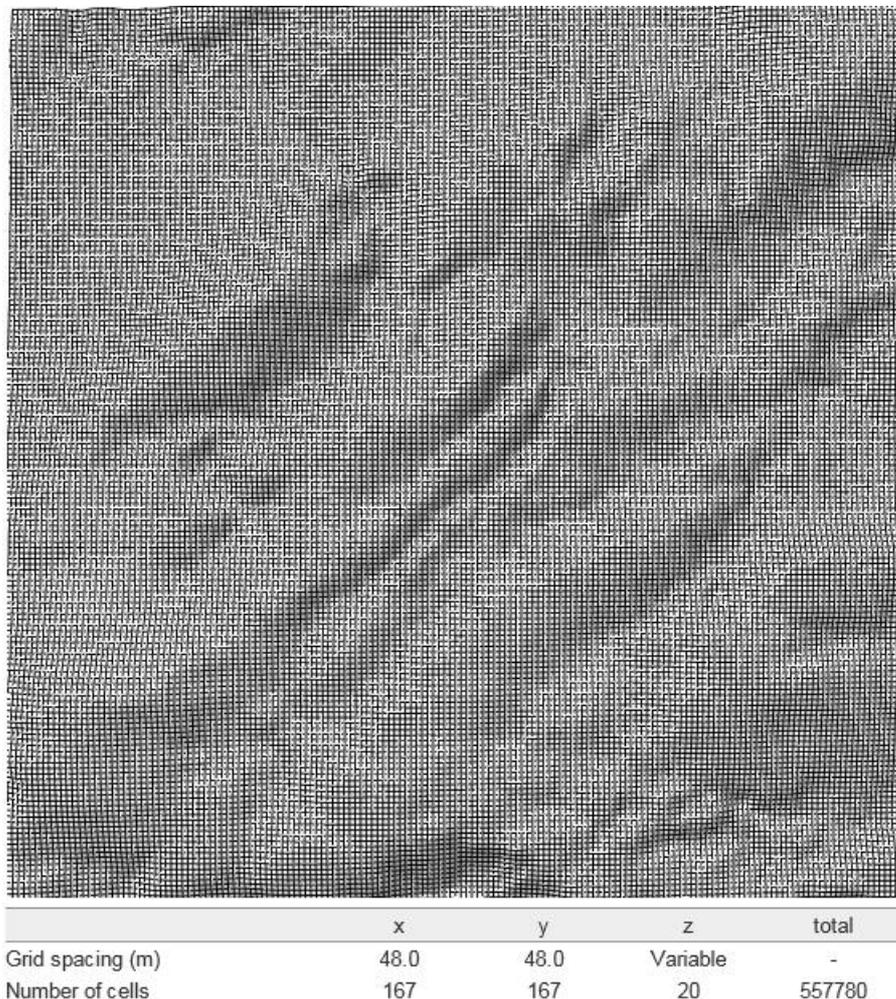
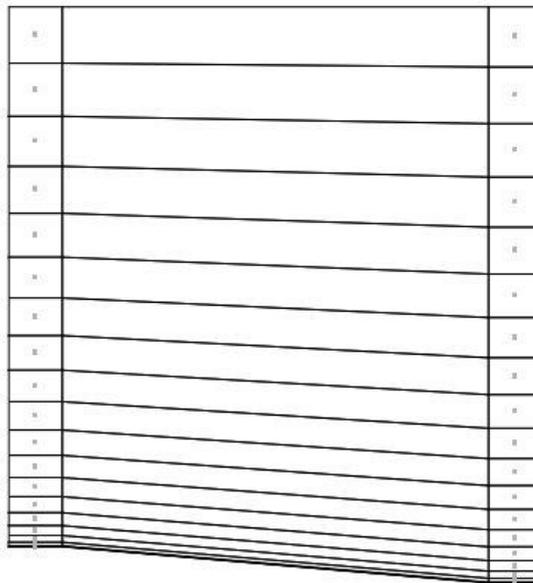


Figura 21: Mesh orizzontale del dominio di calcolo (area Sud Est)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	<b>30 di 48</b>
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	<b>0</b>		

Di seguito invece la discretizzazione verticale del dominio di calcolo e relativa distanza dal terreno dei primi dieci nodi (a titolo di esempio di inserisce il modello di Salemi):



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z-dist. max (m)	2.5	10.2	49.3	145.6	299.3	510.2	778.5	1104.0	1486.8	1926.9
z-dist. min (m)	2.5	10.6	52.3	155.1	319.2	544.3	830.7	1178.2	1586.9	2056.7

Figura 22: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo (area Sud Est)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	31 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

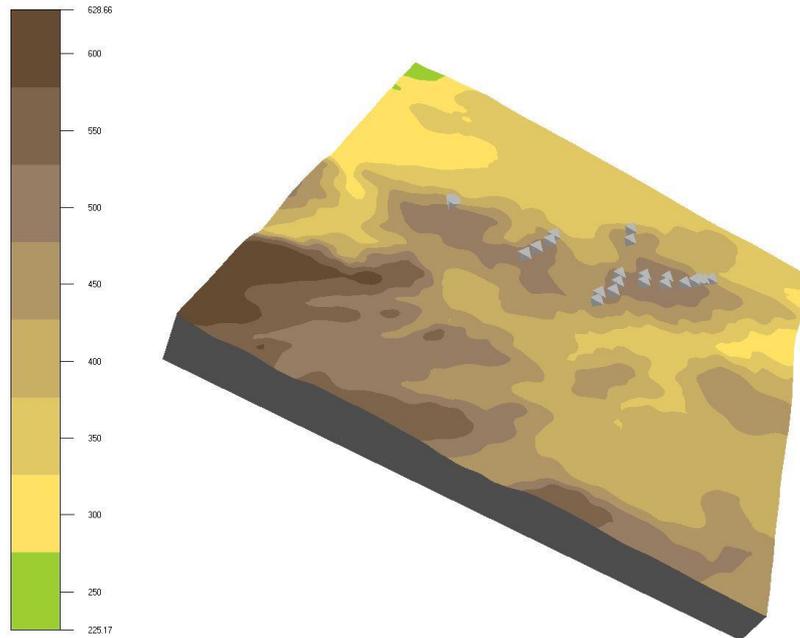


Figura 23: Mappa 3D del sito di Carlentini Nord

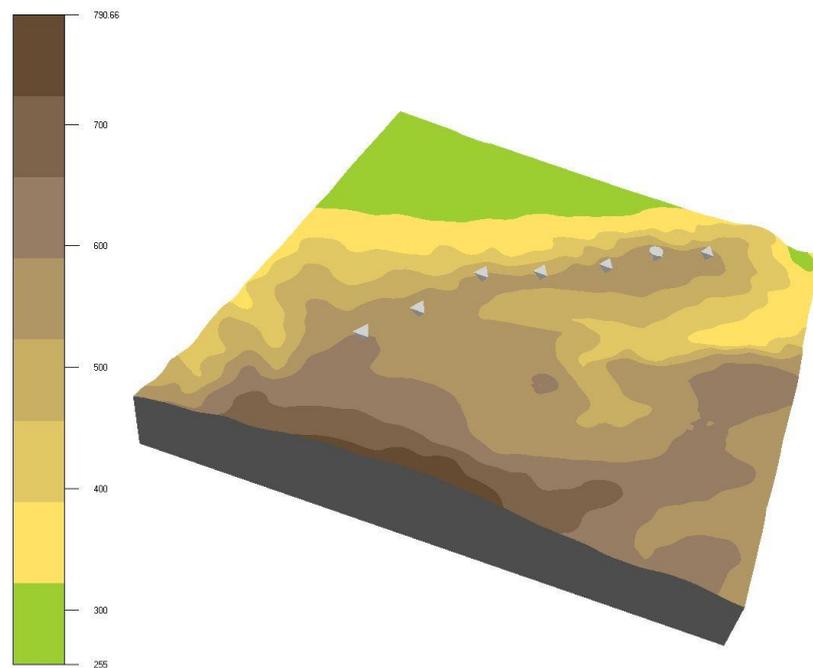


Figura 24: Mappa 3D area del sito di Carlentini Sud Ovest

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	32 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

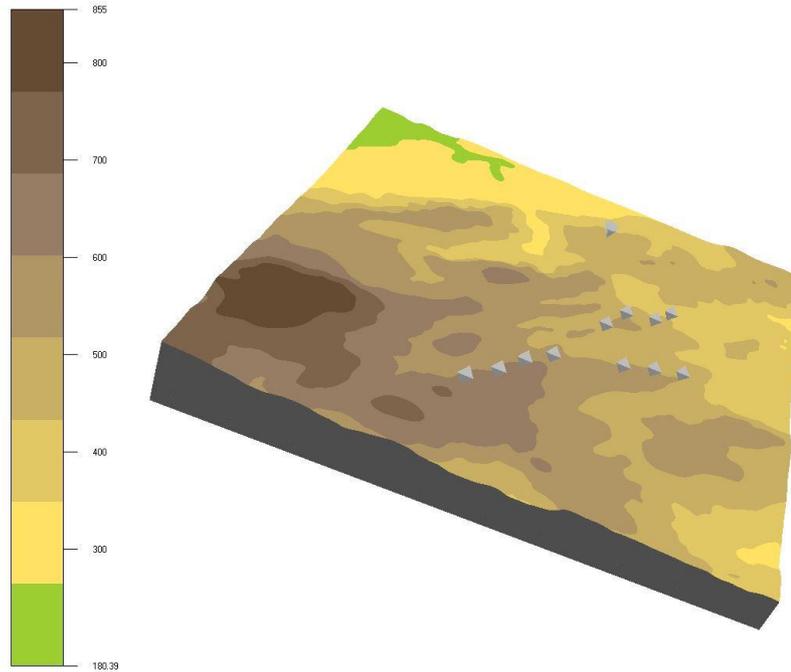


Figura 25: Mappa 3D aerea del sito di Carlentini Sud Est

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CARLENTINI (SR) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	33 di 48
CRL	ENG	REL	0018	0		

## 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.

A titolo di esempio è rappresentata la mappa di rugosità del sito di Carlentini:

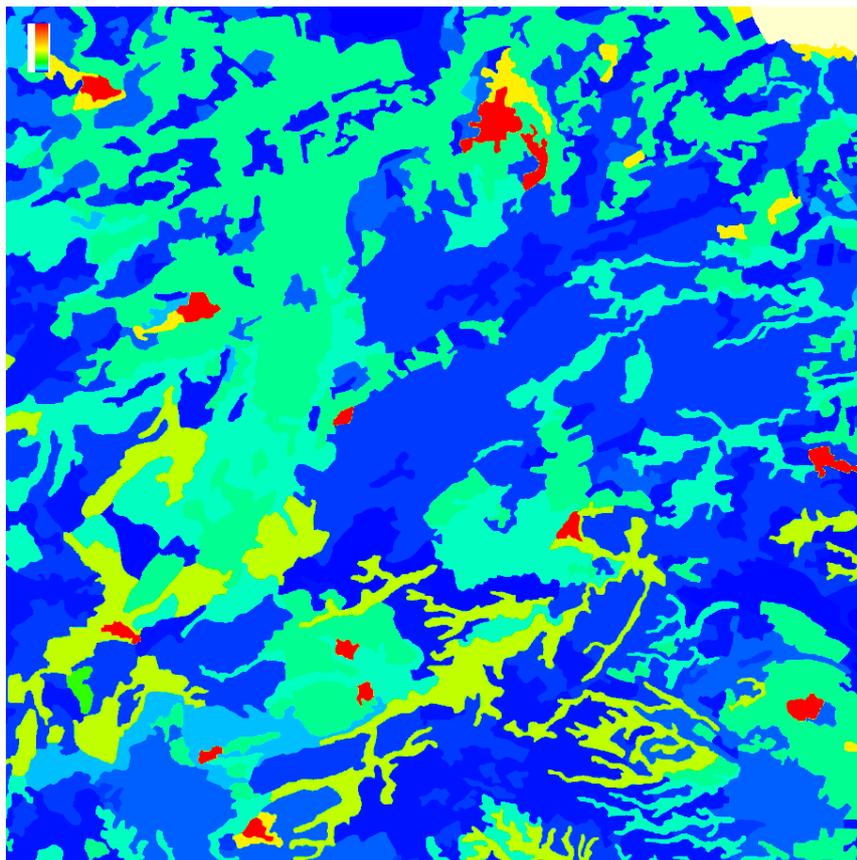


Figura 26: Mappa di rugosità di Carlentini

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	34 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

### 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 riportano le mappe di ventosità relative alle tre aree d'impianto, estrapolate in corrispondenza dell'altezza mozzo di turbina:

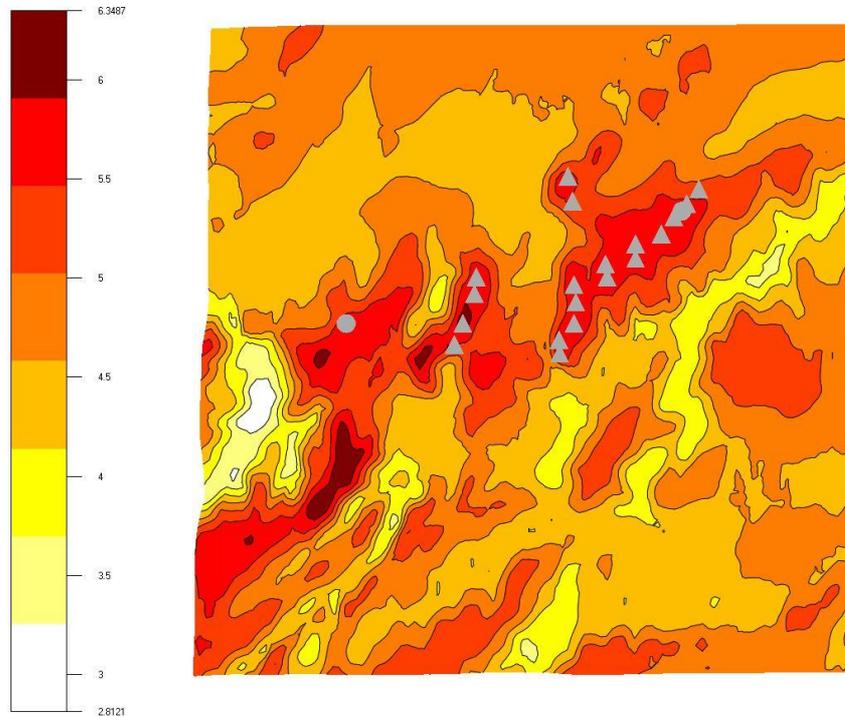


Figura 27: Mappa di ventosità a 50 m s.l.s., Carlentini Nord

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	35 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

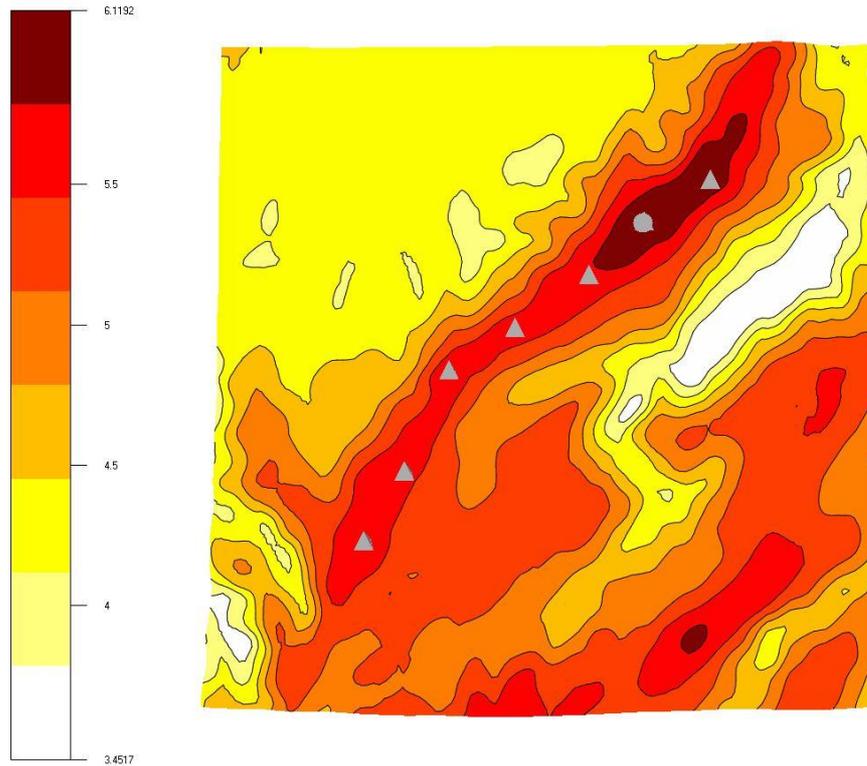


Figura 28: Mappa di ventosità a 101 m s.l.s., Carlentini Sud Ovest

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	36 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

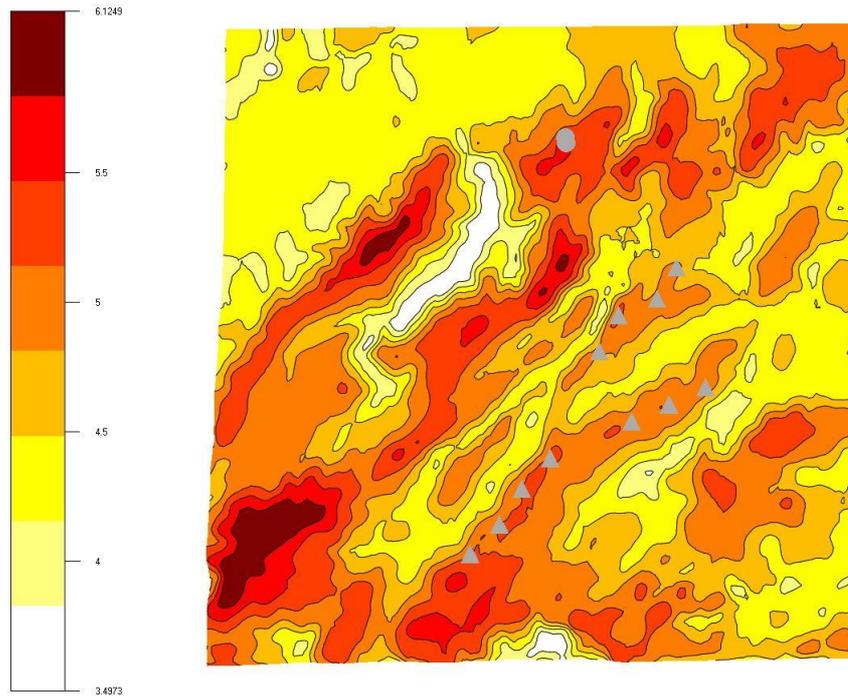


Figura 29: Mappa di ventosità a 101 m s.l.s., Carlentini Sud Est

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	37 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

#### 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 e quindi dell'intero parco risultante dalla somma dei prodotti tra il numero di ore/anno e la potenza certificata per ogni bin di velocità del vento:

	V150 - V52	GE158 - V52	N149 - V52
Numero WTG	18 - 19	18 - 19	18 - 19
Potenza Unitaria (MW)	4.2 - 0.85	5.5 - 0.85	4.8 - 0.85
Produzione media <b>lorda</b> attesa aerogenerataori V52 (MWh/anno)	27069	27069	27069
Produzione media <b>lorda</b> attesa aerogenerataori Multi-Megawatt (MWh/anno)	182348	206971	186840
Produzione media <b>lorda</b> attesa Totale (MWh/anno)	209417	234040	213909

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.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	38 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

V150 - V52					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-CA01	5.38	9820	5.35	9719	1.0%
R-CA02	5.36	9740	5.32	9570	1.7%
R-CA03	5.4	9901	5.36	9768	1.3%
R-CA04	5.41	10003	5.36	9809	1.9%
R-CA05	5.22	9270	5.12	8931	3.7%
R-CA06	5.29	9524	5.12	8860	7.0%
R-CA07	5.21	9256	5.06	8642	6.6%
R-CA08	5.03	8620	4.93	8273	4.0%
R-CA09	5.38	9874	5.25	9405	4.8%
R-CA10	5.2	9255	5.08	8793	5.0%
R-CA11	5.1	8968	5.06	8843	1.4%
R-CA12	5.66	10937	5.66	10918	0.2%
R-CA13	5.57	10541	5.56	10496	0.4%
R-CA14	5.64	10792	5.61	10696	0.9%
R-CA15	5.56	10469	5.5	10257	2.0%
R-CA16	5.74	11215	5.69	11000	1.9%
R-CA17	6	12176	5.94	11945	1.9%
R-CA18	5.94	11987	5.9	11794	1.6%
CA57	5.39	1260	5.38	1258	0.2%
CA58	5.97	1622	5.95	1611	0.7%
CA59	5.57	1371	5.52	1345	1.9%
CA60	5.74	1480	5.72	1474	0.5%
CA61	5.68	1445	5.65	1428	1.2%
CA62	5.69	1456	5.69	1454	0.2%
CA63	5.74	1483	5.7	1463	1.3%
CA64	5.87	1559	5.85	1546	0.8%
CA65	5.56	1367	5.53	1351	1.1%
CA66	5.88	1551	5.8	1497	3.5%
CA67	5.81	1513	5.69	1449	4.2%
CA68	5.84	1522	5.77	1476	3.0%
CA69	5.73	1458	5.63	1405	3.6%
CA70	5.66	1415	5.58	1356	4.2%
CA71	5.63	1398	5.58	1361	2.6%
CA72	5.62	1391	5.57	1358	2.4%
CA73	5.3	1196	5.27	1183	1.1%
CA74	5.35	1239	5.35	1236	0.3%
CA75	5.53	1343	5.51	1334	0.6%
<b>Media</b>	<b>5.56</b>	<b>5660</b>	<b>5.50</b>	<b>5522</b>	<b>2.2%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	39 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

GE158 - V52					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-CA01	5.35	11171	5.32	11054	1.0%
R-CA02	5.34	11050	5.29	10846	1.8%
R-CA03	5.38	11265	5.33	11091	1.5%
R-CA04	5.39	11402	5.34	11159	2.1%
R-CA05	5.19	10465	5.09	10038	4.1%
R-CA06	5.27	10792	5.09	9990	7.4%
R-CA07	5.19	10478	5.03	9730	7.1%
R-CA08	5	9687	4.89	9281	4.2%
R-CA09	5.37	11248	5.21	10619	5.6%
R-CA10	5.18	10460	5.05	9902	5.3%
R-CA11	5.08	10098	5.03	9897	2.0%
R-CA12	5.63	12398	5.63	12377	0.2%
R-CA13	5.54	11894	5.53	11843	0.4%
R-CA14	5.63	12260	5.6	12147	0.9%
R-CA15	5.54	11835	5.47	11587	2.1%
R-CA16	5.72	12756	5.66	12507	2.0%
R-CA17	5.98	13968	5.92	13696	1.9%
R-CA18	5.93	13745	5.88	13533	1.5%
CA57	5.39	1260	5.38	1258	0.2%
CA58	5.97	1622	5.95	1611	0.7%
CA59	5.57	1371	5.52	1345	1.9%
CA60	5.74	1480	5.72	1474	0.5%
CA61	5.68	1445	5.65	1428	1.2%
CA62	5.69	1456	5.69	1454	0.2%
CA63	5.74	1483	5.7	1463	1.3%
CA64	5.87	1559	5.85	1546	0.8%
CA65	5.56	1367	5.53	1351	1.1%
CA66	5.88	1551	5.8	1497	3.5%
CA67	5.81	1513	5.69	1449	4.2%
CA68	5.84	1522	5.77	1476	3.0%
CA69	5.73	1458	5.63	1405	3.6%
CA70	5.66	1415	5.58	1356	4.2%
CA71	5.63	1398	5.58	1361	2.6%
CA72	5.62	1391	5.57	1358	2.4%
CA73	5.3	1196	5.27	1183	1.1%
CA74	5.35	1239	5.35	1236	0.3%
CA75	5.53	1343	5.51	1334	0.6%
<b>Media</b>	<b>5.55</b>	<b>6325</b>	<b>5.49</b>	<b>6159</b>	<b>2.3%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO		PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>		40 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0			

N149 - V52					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-CA01	5.38	10085	5.35	9981	1.0%
R-CA02	5.36	9986	5.32	9808	1.8%
R-CA03	5.4	10164	5.36	10025	1.4%
R-CA04	5.41	10268	5.37	10067	2.0%
R-CA05	5.22	9463	5.13	9106	3.8%
R-CA06	5.29	9750	5.13	9052	7.2%
R-CA07	5.21	9456	5.06	8788	7.1%
R-CA08	5.03	8768	4.93	8406	4.1%
R-CA09	5.38	10123	5.26	9639	4.8%
R-CA10	5.2	9464	5.08	8953	5.4%
R-CA11	5.1	9134	5.06	8996	1.5%
R-CA12	5.66	11213	5.66	11194	0.2%
R-CA13	5.57	10793	5.56	10747	0.4%
R-CA14	5.64	11048	5.62	10950	0.9%
R-CA15	5.56	10698	5.5	10473	2.1%
R-CA16	5.74	11513	5.69	11289	1.9%
R-CA17	6	12557	5.95	12324	1.9%
R-CA18	5.94	12357	5.9	12163	1.6%
CA57	5.39	1260	5.38	1258	0.2%
CA58	5.97	1622	5.95	1611	0.7%
CA59	5.57	1371	5.52	1345	1.9%
CA60	5.74	1480	5.72	1474	0.5%
CA61	5.68	1445	5.65	1428	1.2%
CA62	5.69	1456	5.69	1454	0.2%
CA63	5.74	1483	5.7	1463	1.3%
CA64	5.87	1559	5.85	1546	0.8%
CA65	5.56	1367	5.53	1351	1.1%
CA66	5.88	1551	5.8	1497	3.5%
CA67	5.81	1513	5.69	1449	4.2%
CA68	5.84	1522	5.77	1476	3.0%
CA69	5.73	1458	5.63	1405	3.6%
CA70	5.66	1415	5.58	1356	4.2%
CA71	5.63	1398	5.58	1361	2.6%
CA72	5.62	1391	5.57	1358	2.4%
CA73	5.3	1196	5.27	1183	1.1%
CA74	5.35	1239	5.35	1236	0.3%
CA75	5.53	1343	5.51	1334	0.6%
<b>Media</b>	<b>5.56</b>	<b>5781</b>	<b>5.50</b>	<b>5636</b>	<b>2.2%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	41 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

## 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:

	Multi-Megawatt	V52
Perdite per mancata disponibilità di sistema (WTG + BOS) dell'impianto	3.00%	2.00%
Perdite elettriche (cavidotto MT – consegna in AT)	3.20%	1.50%
Perdite varie (basate sull'esperienza, in funzione dell'indice di turbolenza del vento)	2.50%	1.50%
Perdite ambientali	0.20%	0.20%
Perdite dovute al rumore	0.40%	0.00%
Perdite per ombreggiamento	0.08%	0.00%
Totale perdite escluso scie	9.07%	5.11%

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

	V52	V150	GE158	N149
Numero WTG	19	18	18	18
Produzione netta WTG -P50 (MWh/anno)	1328	8978	10169	9192

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

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

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	42 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	<b>0</b>		

V150	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-CA01	5.38	2104
R-CA02	5.36	2072
R-CA03	5.4	2115
R-CA04	5.41	2124
R-CA05	5.22	1934
R-CA06	5.29	1918
R-CA07	5.21	1871
R-CA08	5.03	1791
R-CA09	5.38	2036
R-CA10	5.2	1904
R-CA11	5.1	1914
R-CA12	5.66	2364
R-CA13	5.57	2272
R-CA14	5.64	2316
R-CA15	5.56	2221
R-CA16	5.74	2381
R-CA17	6	2586
R-CA18	5.94	2553
<b>Media</b>	<b>5.45</b>	<b>2138</b>

V52	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
CA57	5.39	1405
CA58	5.97	1798
CA59	5.57	1501
CA60	5.74	1645
CA61	5.68	1595
CA62	5.69	1623
CA63	5.74	1633
CA64	5.87	1725
CA65	5.56	1508
CA66	5.88	1671
CA67	5.81	1618
CA68	5.84	1648
CA69	5.73	1568
CA70	5.66	1514
CA71	5.63	1520
CA72	5.62	1516
CA73	5.3	1320
CA74	5.35	1380
CA75	5.53	1490
<b>Media</b>	<b>5.66</b>	<b>1562</b>

<b>Media Impianto</b>	<b>5.56</b>	<b>2036</b>
-----------------------	-------------	-------------

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	43 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

GE158	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-CA01	5.35	1827
R-CA02	5.34	1793
R-CA03	5.38	1834
R-CA04	5.39	1845
R-CA05	5.19	1660
R-CA06	5.27	1652
R-CA07	5.19	1609
R-CA08	5	1534
R-CA09	5.37	1756
R-CA10	5.18	1637
R-CA11	5.08	1636
R-CA12	5.63	2046
R-CA13	5.54	1958
R-CA14	5.63	2008
R-CA15	5.54	1916
R-CA16	5.72	2068
R-CA17	5.98	2264
R-CA18	5.93	2237
<b>Media</b>	<b>5.43</b>	<b>1849</b>

V52	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
CA57	5.39	1405
CA58	5.97	1798
CA59	5.57	1501
CA60	5.74	1645
CA61	5.68	1595
CA62	5.69	1623
CA63	5.74	1633
CA64	5.87	1725
CA65	5.56	1508
CA66	5.88	1671
CA67	5.81	1618
CA68	5.84	1648
CA69	5.73	1568
CA70	5.66	1514
CA71	5.63	1520
CA72	5.62	1516
CA73	5.3	1320
CA74	5.35	1380
CA75	5.53	1490
<b>Media</b>	<b>5.66</b>	<b>1562</b>

<b>Media Impianto</b>	<b>5.55</b>	<b>1809</b>
-----------------------	-------------	-------------

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	44 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

N149	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-CA01	5.38	1891
R-CA02	5.36	1858
R-CA03	5.4	1899
R-CA04	5.41	1907
R-CA05	5.22	1725
R-CA06	5.29	1715
R-CA07	5.21	1665
R-CA08	5.03	1592
R-CA09	5.38	1826
R-CA10	5.2	1696
R-CA11	5.1	1704
R-CA12	5.66	2120
R-CA13	5.57	2036
R-CA14	5.64	2074
R-CA15	5.56	1984
R-CA16	5.74	2138
R-CA17	6	2335
R-CA18	5.94	2304
<b>Media</b>	<b>5.45</b>	<b>1915</b>

V52	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
CA57	5.39	1405
CA58	5.97	1798
CA59	5.57	1501
CA60	5.74	1645
CA61	5.68	1595
CA62	5.69	1623
CA63	5.74	1633
CA64	5.87	1725
CA65	5.56	1508
CA66	5.88	1671
CA67	5.81	1618
CA68	5.84	1648
CA69	5.73	1568
CA70	5.66	1514
CA71	5.63	1520
CA72	5.62	1516
CA73	5.3	1320
CA74	5.35	1380
CA75	5.53	1490
<b>Media</b>	<b>5.66</b>	<b>1562</b>

<b>Media Impianto</b>	<b>5.56</b>	<b>1859</b>
-----------------------	-------------	-------------

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	45 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

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

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

	V52	V150	V52	GE158	V52	N149
Numero WTG	19	18	19	18	19	18
Producibilità netta per modello di aerogeneratore (MWh/anno)	25225	161597	25225	183033	25225	165451
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	186822		208258		190677	

Una volta ottenuto il valore P50, rappresentativo di tutto l'impianto, vengono individuati i relativi valori di producibilità P62.5 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 le tabelle per ogni sotto-area:

	V150 - V52	
incertezza sulla storicizzazione del sito	6.0%	5.6%
incertezza sul processo di micrositing	9.8%	14.6%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5.0%	5.0%
<b>Incertezza complessiva</b>	<b>12.6%</b>	<b>16.5%</b>

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	46 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

	<b>GE158 - V52</b>	
incertezza sulla storicizzazione del sito	6.0%	5.6%
incertezza sul processo di micrositing	9.5%	14.6%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5.0%	5.0%
<b>Incertezza complessiva</b>	<b>12.3%</b>	<b>16.5%</b>

	<b>N149 - V52</b>	
incertezza sulla storicizzazione del sito	6.0%	5.6%
incertezza sul processo di micrositing	9.8%	14.6%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5.0%	5.0%
<b>Incertezza complessiva</b>	<b>12.6%</b>	<b>16.5%</b>

Considerando proprio l'incertezza complessiva ottenuta, si possono infine determinare, a partire dal P50, i percentili P62.5, P75 e P90.

	<b>V52</b>	
P50 (GWh/anno) - ore equivalenti	25.2	1562
P62.5 (GWh/anno) - ore equivalenti	23.9	1480
P75 (GWh/anno) - ore equivalenti	22.4	1388
P90 (GWh/anno) - ore equivalenti	19.9	1232

	<b>V150</b>	
P50 (GWh/anno) - ore equivalenti	161.6	2138
P62.5 (GWh/anno) - ore equivalenti	155.1	2052
P75 (GWh/anno) - ore equivalenti	147.9	1957
P90 (GWh/anno) - ore equivalenti	135.6	1794

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	47 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

	<b>GE 158</b>	
P50 (GWh/anno)	183.0	1849
P62.5 (GWh/anno)	175.8	1776
P75 (GWh/anno)	167.8	1695
P90 (GWh/anno)	154.1	1557

	<b>N149</b>	
P50 (GWh/anno)	165.5	1915
P62.5 (GWh/anno)	158.8	1838
P75 (GWh/anno)	151.4	1753
P90 (GWh/anno)	138.8	1607

WTG model and number of WTG	<b>V52</b>	<b>V150</b>
		19
P50 (GWh/year)	186.8	
P62.5 (GWh/year)	179.0	
P75 (GWh/year)	170.3	
P90 (GWh/year)	155.5	

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	<b>CARLENTINI (SR)</b> <b>Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità</b>	48 di 48
<b>CRL</b>	<b>ENG</b>	<b>REL</b>	<b>0018</b>	0		

WTG model and number of WTG	V52	GE158
		19
P50 (GWh/year)	208.3	
P62.5 (GWh/year)	199.7	
P75 (GWh/year)	190.2	
P90 (GWh/year)	174.0	

WTG model and number of WTG	V52	N149
		19
P50 (GWh/year)	190.7	
P62.5 (GWh/year)	182.7	
P75 (GWh/year)	173.9	
P90 (GWh/year)	158.7	