

REGIONE SICILIA
Provincia di Palermo
COMUNE DI CAMPOREALE

PROGETTO

POTENZIAMENTO PARCO EOLICO CAMPOREALE



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE



PROGETTISTA:

HE **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 PRODUCIBILITÀ

CODICE PROGETTISTA	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO				
					IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.
	22/03/2019	/	1 di 33	A4	CAM	ENG	REL	0026	00

NOME FILE: CAM-ENG-REL-0026_00.doc



CAMPOREALE

STUDIO ANEMOLOGICO *Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità*

1	11/04/2019	Prima emissione	CDM/MBB	FC	CD
REV.	DATA	ATTIVITÀ	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

CODICE DOCUMENTO					NOME FILE	PAGINA
PRG	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV	CAM-ENG-REL-0026-01	1 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	2 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

INDICE

1	INTRODUZIONE	4
2	RAPPRESENTAZIONE DEL SITO	5
2.1	Descrizione del sito.....	5
2.2	Layout ripotenziato	7
2.3	Aerogeneratori adottati.....	8
2.4	Allacciamento alla rete elettrica	10
3	CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA	11
3.1	Strumenti utilizzati	11
3.2	Raccolta dei dati e validazione.....	12
3.3	Analisi anemologica e statistica dei dati	13
4	CURVA DI POTENZA	19
5	APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD	21
5.1	Il modello digitale del terreno.....	21
5.2	La rugosità.....	23
5.3	La risorsa eolica.....	24
5.4	Risultati del modello	25
6	ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE	27

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	3 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

LISTA DELLE FIGURE

<i>Figura 1: Inquadramento del sito.....</i>	5
<i>Figura 2: Crinale di Camporeale</i>	6
<i>Figura 3: Inquadramento del sito, vista da Sud</i>	6
<i>Figura 4: Stazioni di misura in sito</i>	11
<i>Figura 5: Validazione anemometro</i>	12
<i>Figura 6: Profilo giornaliero di velocità CR03</i>	13
<i>Figura 7: Profilo mensile di velocità CR03.....</i>	13
<i>Figura 8: Profilo di velocità verticale.....</i>	14
<i>Figura 9: Tabella di frequenze CR01-50 m.....</i>	16
<i>Figura 10: Tabella di frequenze CR03-50 m.....</i>	17
<i>Figura 11: Aerogeneratore Nordex N117 3.6</i>	19
<i>Figura 12: Aerogeneratore Senvion M114 3.6.....</i>	20
<i>Figura 13: Discretizzazione orizzontale del dominio di calcolo</i>	21
<i>Figura 14: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo</i>	22
<i>Figura 15: Mappa di rugosità</i>	23
<i>Figura 16: Mappa di ventosità a 91m s.l.s.....</i>	24

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	4 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	5 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

2 RAPPRESENTAZIONE DEL SITO

2.1 Descrizione del sito

L'impianto esistente è situato nella fascia sud della provincia di Palermo e comprende il comune di Camporeale. Il parco attuale è costituito da un'unità produttiva: composta da 24 turbine eoliche Vestas V52 da 850 kW, per una potenza complessiva di 20.4 MW.

Il nuovo layout ripotenziato si sviluppa nell'area del parco già esistente e prevede un numero totale di 13 macchine.

La zona presenta un'orografia piuttosto complessa: è presente un crinale che si estende da Ovest verso Est con altezze che arrivano fino a 560 m s.l.m.

L'impianto si trova nelle vicinanze di Camporeale.

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

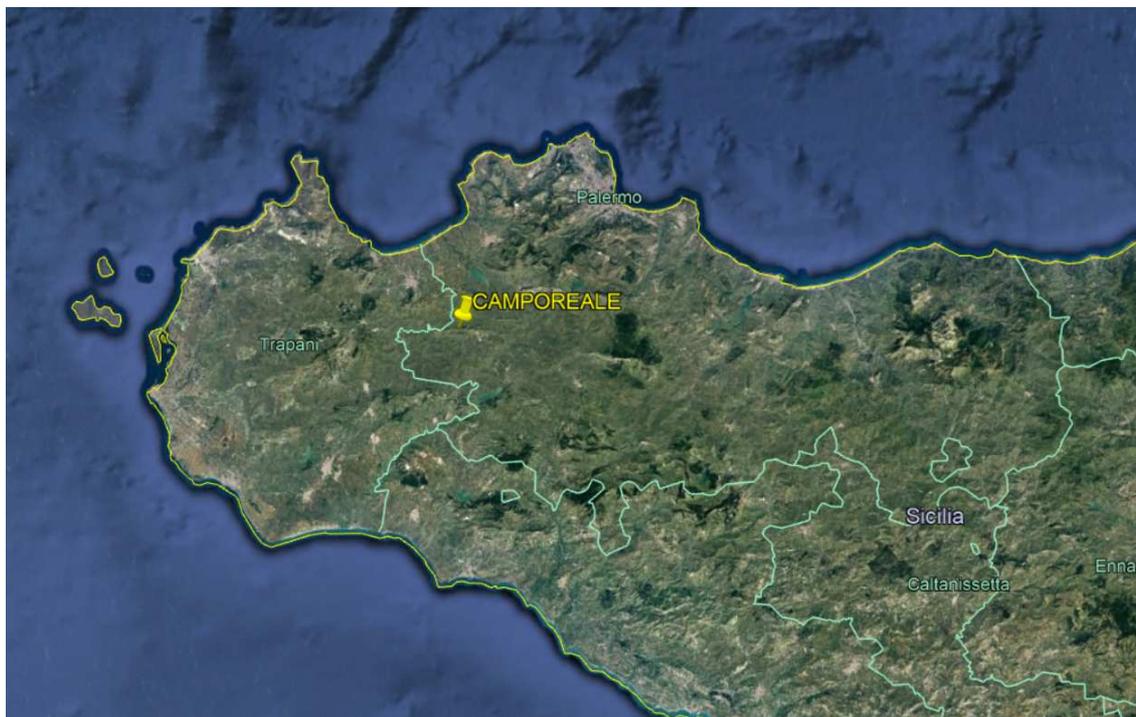


Figura 1: Inquadramento del sito

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	6 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		



Figura 2: Crinale di Camporeale



Figura 3: Inquadramento del sito, vista da Sud

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	7 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

2.2 Layout ripotenziato

Il layout di impianto è composto da 13 aerogeneratori, dislocati all'interno del territorio comunale di Camporeale.

Gli aerogeneratori sono disposti sul crinale 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	
WTG			
R-CR01	327033	4196935	340
R-CR02	327371	4196850	340
R-CR03	327713	4196939	381
R-CR04	328065	4196954	419
R-CR05	328418	4196951	426
R-CR06	328772	4196952	465
R-CR07	329274	4197018	452
R-CR08	329586	4197005	498
R-CR09	329928	4196924	518
R-CR10	330280	4196899	540
R-CR11	330626	4196832	540
R-CR12	331163	4196636	574
R-CR13	331599	4196836	575

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	8 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

2.3 Aerogeneratori adottati

Per la stima di producibilità energetica di Camporeale 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 la Nordex N117 3.6 MW ad altezza mozzo 91 m la cui curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito è:

Modello	N117 3.6
Produttore	Nordex
Potenza (MW)	3.675
Diametro (m)	117
Altezza del mozzo (m)	91

Velocità del vento (m/s)	N117 [$\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$] (kW)
3	12
4	135
5	331
6	604
7	978
8	1468
9	2057
10	2681
11	3213
12	3522
13	3656
14	3675
15	3675
16	3675
17	3675
18	3675
19	3675
20	3675
21	3675
22	3675
23	3675
24	3675
25	3675

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	9 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

Il secondo aereogeneratore preso in esame è il modello Senvion M114 da 3.6 MW, altezza mozzo 90 m

Modello	M114
Produttore	Senvion
Potenza (MW)	3.6
Diametro (m)	114
Altezza del mozzo (m)	90

Velocità del vento (m/s)	M114 [$\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$] (kW)
3	39
4	151
5	321
6	569
7	918
8	1388
9	1948
10	2519
11	3040
12	3421
13	3582
14	3600
15	3600
16	3600
17	3600
18	3600
19	3600
20	3600
21	3600
22	3600

Per un ulteriore approfondimento delle curve utilizzate nel software si rimanda al capitolo 4.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	10 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	11 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

3 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

3.1 Strumenti utilizzati

La campagna anemometrica è stata condotta in sito con due stazioni di misura

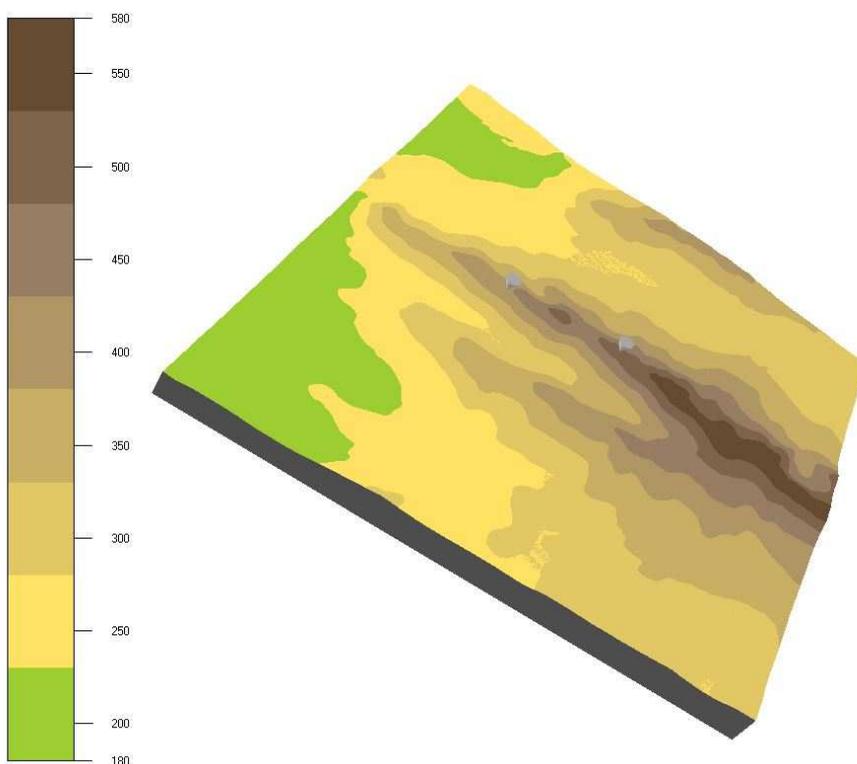


Figura 4: Stazioni di misura in sito

Stazione anemometrica	Coord est	Coord nord	Quota (m)	Altezza (m)	dal	al
CR01	328375	4196904	417 mt	10 mt	04/11/2003	01/01/2016
CR03	329697	4197004	504 mt	10 mt	24/05/2006	01/01/2016

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.		
CAM	ENG	REL	0026	1	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	12 di 32

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.



Figura 5: 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.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	13 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

3.3 Analisi anemologica e statistica dei dati

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

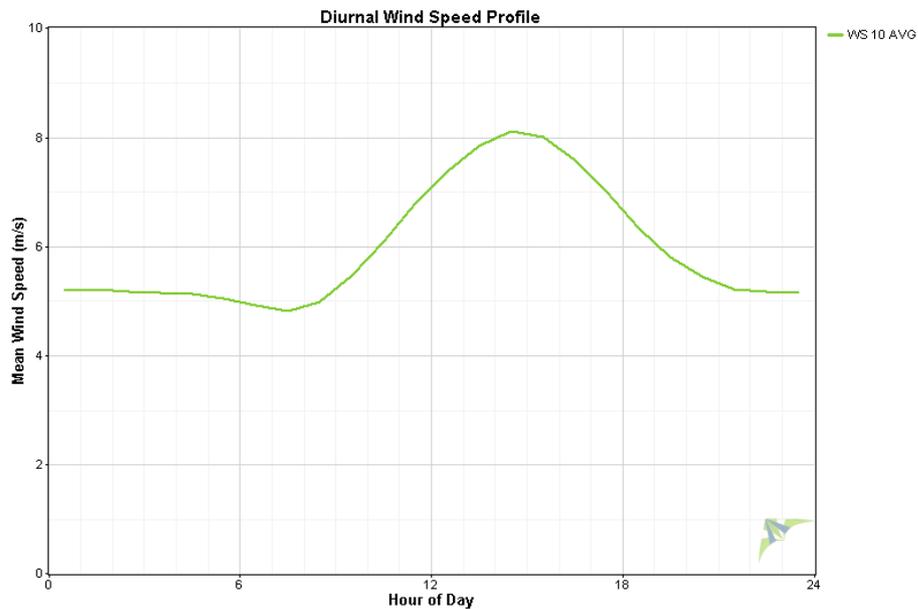


Figura 6: Profilo giornaliero di velocità CR03

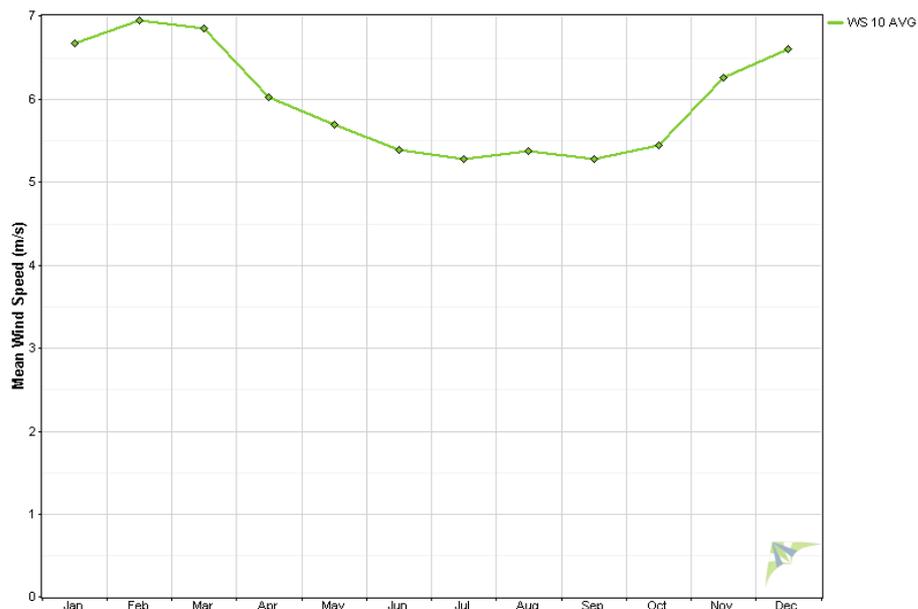


Figura 7: Profilo mensile di velocità CR03

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	14 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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

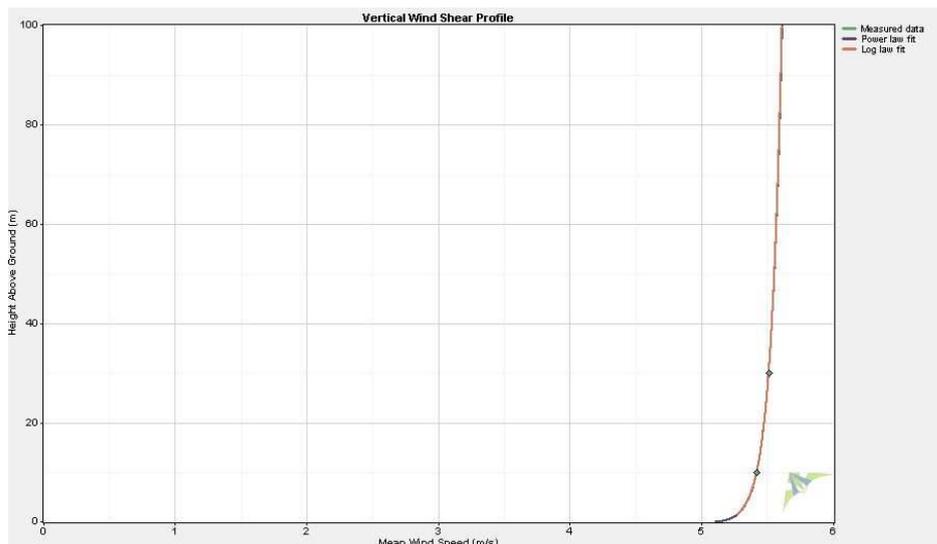


Figura 8: Profilo di velocità verticale

Definito il profilo verticale si è in grado di calcolare il gradiente al suolo della velocità (α : "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 (α) consente poi di estrapolare la velocità del vento all'altezza mozzo delle macchine che, nel caso del modello installato (Vestas 52), è pari a 50m:

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

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.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	15 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

Nel caso specifico di Camporeale, 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 α (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, ovvero a 50m 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).

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):

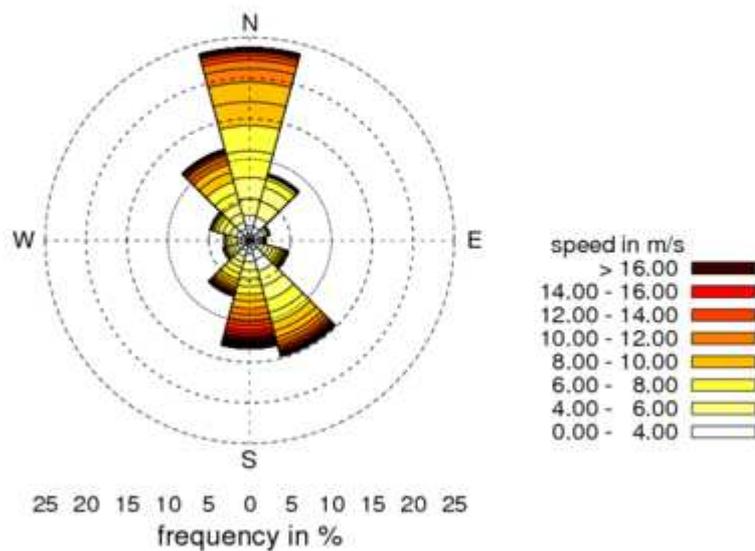
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	16 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

site name	CR01-50		
filename	6282_CR01_50		
measurement period	04.11.03 - 31.12.15	# records = 619735	
position	x = 328377.0	y = 4196906.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.49	A = 6.28	average = 5.59

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	2.23	2.11	1.53	1.24	1.48	1.41	1.59	1.60	1.63	1.84	1.98	1.93
A	7.38	4.31	2.65	3.14	5.18	6.18	9.03	6.40	4.11	3.61	4.78	7.06
freq	23.7	8.5	2.6	2.0	4.8	14.7	13.3	7.1	3.4	3.2	5.0	11.6
mean	6.42	3.68	2.32	2.86	4.58	5.64	7.93	5.58	3.57	3.08	4.11	6.04

Figura 9: Tabella di frequenze CR01-50 m

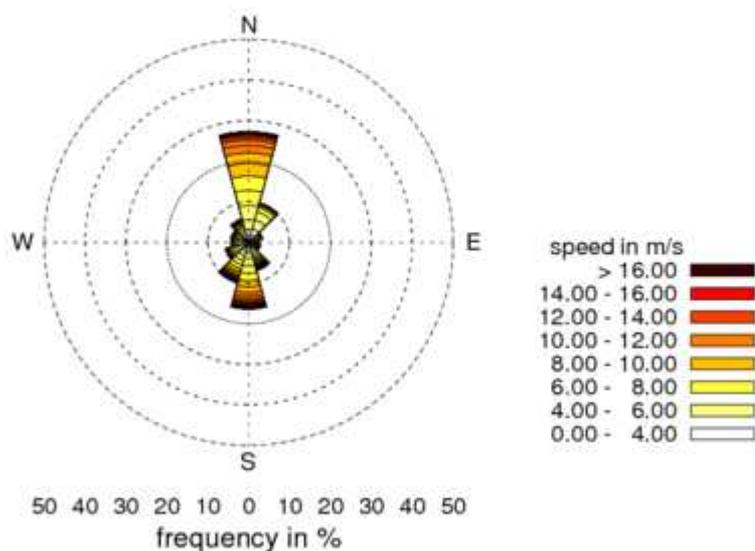
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	17 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

site name	CR03-50		
filename	6283-CR03-50		
measurement period	24.05.06 - 31.12.15	# records =	497333
position	x = 329694.0	y = 4197000.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.66	A = 6.38	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	2.19	2.06	1.61	1.64	1.54	1.45	1.71	1.62	1.71	1.92	1.92	1.70
A	7.34	4.37	4.21	4.73	5.05	6.91	7.72	6.68	5.49	4.86	5.69	6.05
freq	27.2	10.0	3.4	2.5	2.9	7.1	16.3	10.2	5.8	4.2	4.3	5.9
mean	6.47	3.74	3.59	3.99	4.38	6.23	6.90	6.01	4.82	4.22	4.88	5.33

Figura 10: Tabella di frequenze CR03-50 m

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 (α : "wind shear exponent".) che meglio rappresentasse il sito nel complesso.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	18 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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=90m, HH=91m e HH91.5m).

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

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	19 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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. 467 s.l.m. dell'area d'impianto). Si ipotizza quindi un valore di densità dell'aria media pari a $\rho = 1,150 \text{ kg/m}^3$.

Il primo aerogeneratore analizzato è la Nordex N117 3.6 MW, la cui curva di potenza, in modalità PM1 potenziata a 3.675 MW di potenza massima, alla densità media di sito risulta:

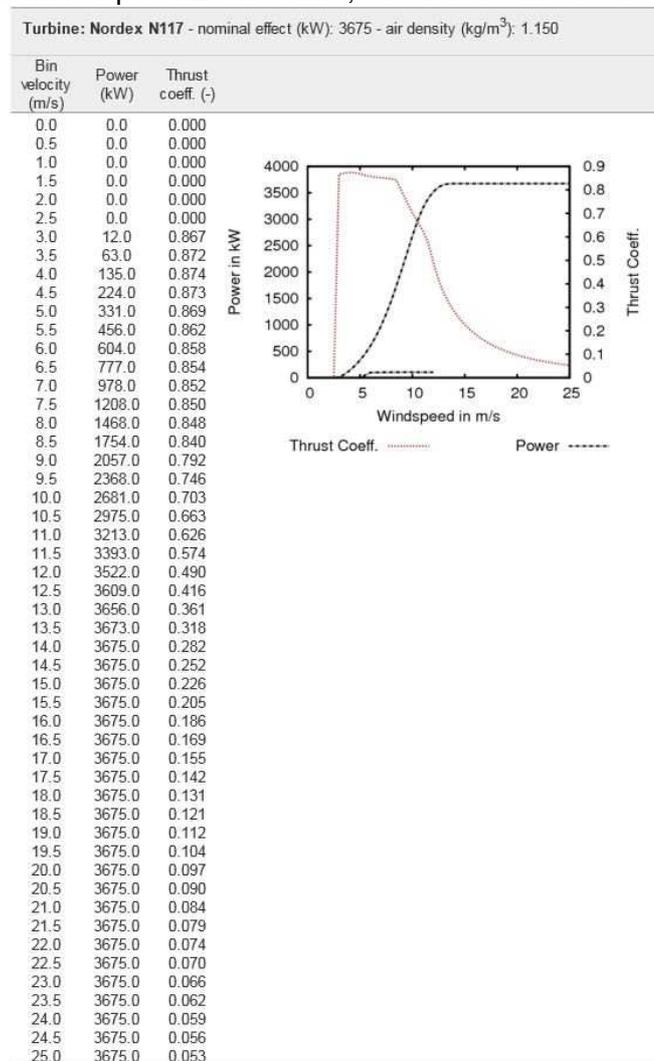


Figura 11: Aerogeneratore Nordex N117 3.6

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	20 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

Il terzo aerogeneratore è la Senvion M114 3.6 MW, la cui curva di potenza, alla densità media di sito risulta:

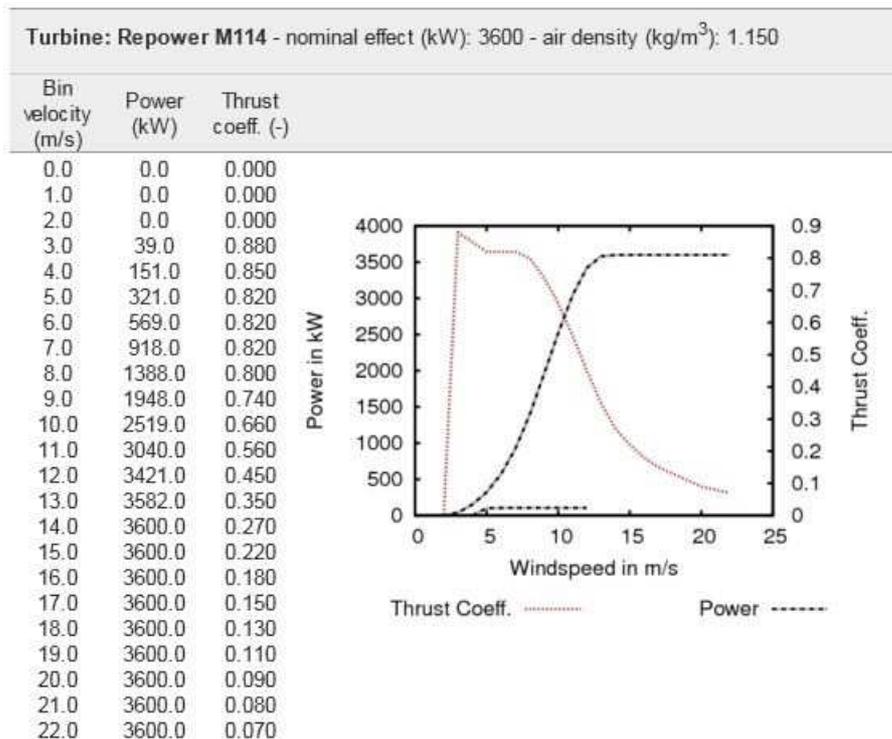


Figura 12: Aerogeneratore Senvion M114 3.6

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	21 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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 40 m, fornisce informazioni sul comportamento del vento nei vari settori di provenienza, nonché i profili verticali della velocità nei punti più significativi, quali anemometri e/o aerogeneratori. Di seguito è riportato il dominio di calcolo.

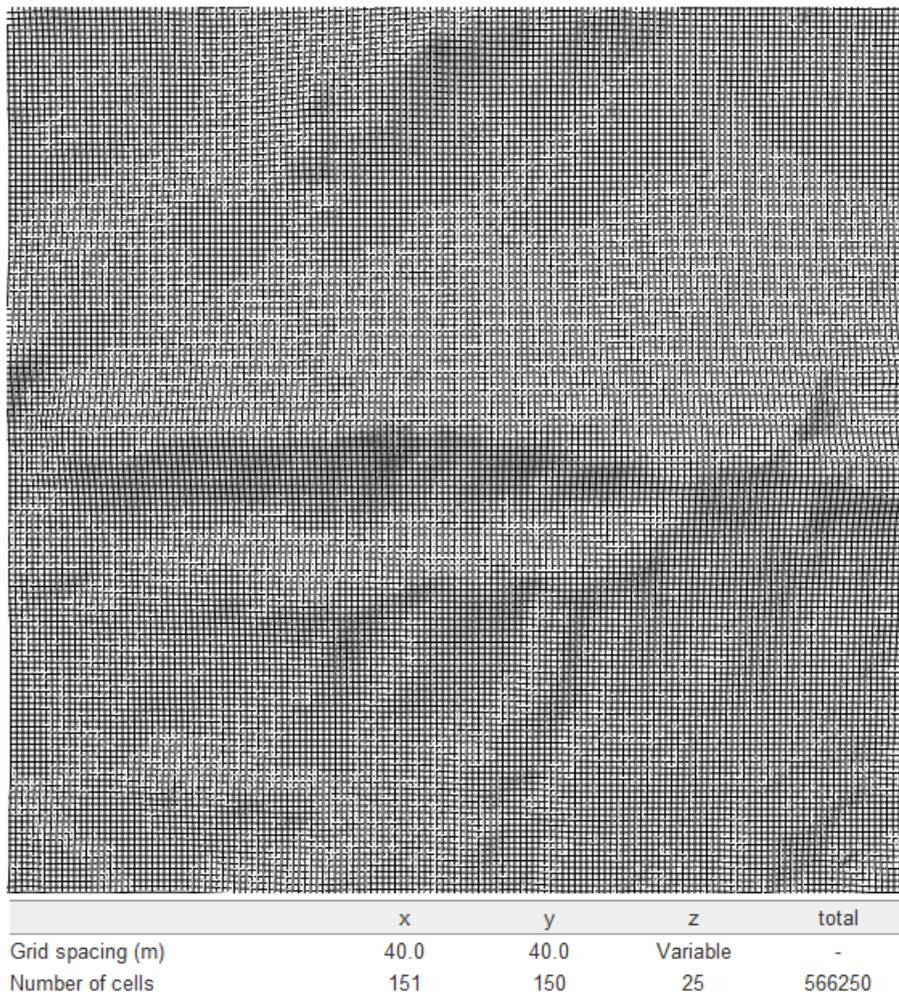
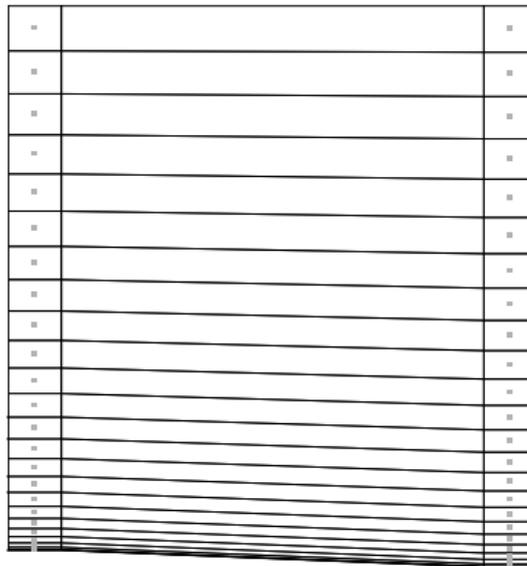


Figura 13: Discretizzazione orizzontale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	22 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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	10.4	44.2	124.1	250.2	422.5	640.9	905.4	1216.1	1573.0
z-dist. min (m)	2.5	10.5	45.4	127.8	257.8	435.3	660.4	933.1	1253.4	1621.2

Figura 14: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	23 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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.

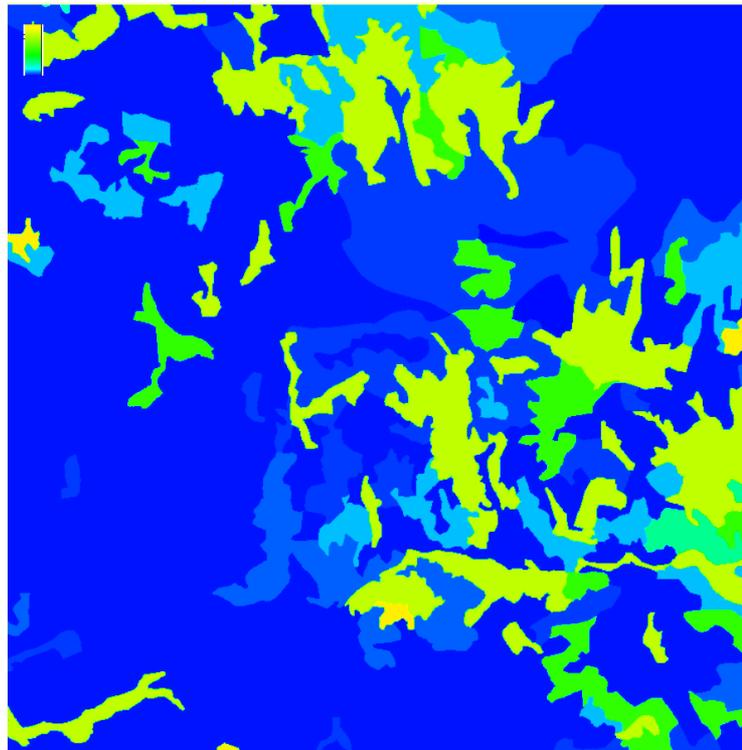


Figura 15: Mappa di rugosità

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	24 di 32
CAM	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 91 m s.l.s., cioè a quota mozzo della configurazione della Nordex N117.

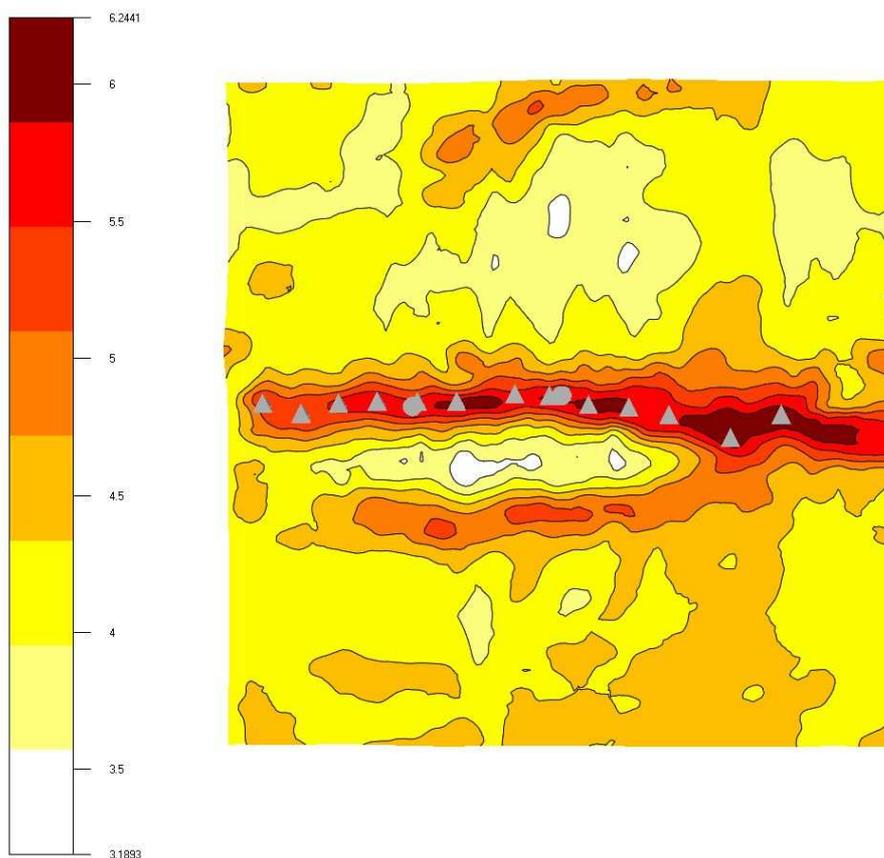


Figura 16: Mappa di ventosità a 91m s.l.s

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	25 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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:

	N117	M114
Numero WTG	13	13
Potenza Unitaria (MW)	3.6	3.6
Produzione Media lorda Attesa (MWh/anno)	101915	97618

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.

	N117				
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-CR01	5.27	6543	5.24	6463	1.2%
R-CR02	5.29	6646	5.25	6534	1.7%
R-CR03	5.68	7656	5.65	7573	1.1%
R-CR04	5.73	7763	5.69	7676	1.1%
R-CR05	5.76	7844	5.72	7777	0.9%
R-CR06	5.95	8266	5.91	8173	1.1%
R-CR07	5.59	7374	5.55	7297	1.0%
R-CR08	5.87	8060	5.8	7904	1.9%
R-CR09	5.97	8345	5.91	8206	1.7%
R-CR10	5.86	8058	5.81	7924	1.7%
R-CR11	5.8	7887	5.75	7766	1.5%
R-CR12	6.15	8886	6.12	8779	1.2%
R-CR13	6.04	8589	6	8479	1.3%
Media	5.77	7840	5.72	7734	1.3%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	26 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

M114					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-CR01	5.27	6285	5.24	6215	1.1%
R-CR02	5.29	6369	5.24	6270	1.5%
R-CR03	5.68	7332	5.65	7268	0.9%
R-CR04	5.73	7431	5.69	7356	1.0%
R-CR05	5.76	7506	5.72	7446	0.8%
R-CR06	5.95	7881	5.91	7801	1.0%
R-CR07	5.58	7075	5.54	7011	0.9%
R-CR08	5.87	7749	5.81	7615	1.7%
R-CR09	5.97	8006	5.92	7890	1.5%
R-CR10	5.86	7721	5.81	7607	1.5%
R-CR11	5.79	7557	5.75	7455	1.3%
R-CR12	6.15	8493	6.12	8415	0.9%
R-CR13	6.04	8212	6	8116	1.2%
Media	5.76	7509	5.72	7420	1.2%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	27 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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:

Perdite per mancata disponibilità di sistema (WTG + BOS) dell'impianto	3.00%
Perdite elettriche (cavidotto MT – consegna in AT)	3.20%
Perdite varie (basate sull'esperienza, in funzione dell'indice di turbolenza del vento)	1.50%
Perdite ambientali	0.20%
Perdite dovute al rumore	1.67%
Totale perdite escluso scie	9.24%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	28 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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

	N117
Numero aerogeneratori	13
Produzione netta per WTG -P50 (MWh/anno)	7020
	M114
Numero aerogeneratori	13
Produzione netta per WTG -P50 (MWh/anno)	6735

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

$$Pr od_{netta_specifica} = \frac{Pr od_{netta_WTG}}{Pot_{nom_WTG}}$$

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	29 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

N117	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-CR01	5.27	1596
R-CR02	5.29	1614
R-CR03	5.68	1870
R-CR04	5.73	1896
R-CR05	5.76	1921
R-CR06	5.95	2018
R-CR07	5.59	1802
R-CR08	5.87	1952
R-CR09	5.97	2026
R-CR10	5.86	1957
R-CR11	5.80	1918
R-CR12	6.15	2168
R-CR13	6.04	2094
Media	5.77	1910

M114	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-CR01	5.27	1567
R-CR02	5.29	1581
R-CR03	5.68	1832
R-CR04	5.73	1855
R-CR05	5.76	1877
R-CR06	5.95	1967
R-CR07	5.58	1768
R-CR08	5.87	1920
R-CR09	5.97	1989
R-CR10	5.86	1918
R-CR11	5.79	1879
R-CR12	6.15	2122
R-CR13	6.04	2046
Media	5.76	1871

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	30 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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

$$Pr od_{netta_tot} = Pr od_{netta_WTG} \times N_{WTG}$$

	N117
Numero aerogeneratori	13
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	91257

	N114
Numero aerogeneratori	13
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	87551

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	31 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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:

	N117
incertezza sulla storicizzazione del sito	4.7%
incertezza sul processo di micrositing	22.5%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5.0%
Incetezza complessiva	23.6%

	M114
incertezza sulla storicizzazione del sito	4.7%
incertezza sul processo di micrositing	22.3%
incertezza sulla misura della curva di potenza	5.0%
Incetezza complessiva	23.3%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	CAMPOREALE (PA) Studio Anemologico Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	32 di 32
CAM	ENG	REL	0026	1		

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.

N117		
P50 (GWh - ore equivalenti)	91.3	1910
P62.5 (GWh - ore equivalenti)	84.4	1767
P75 (GWh - ore equivalenti)	76.8	1607
P90 (GWh - ore equivalenti)	63.7	1334

M114		
P50 (GWh - ore equivalenti)	87.6	1871
P62.5 (GWh - ore equivalenti)	81.0	1731.6
P75 (GWh - ore equivalenti)	73.8	1576.2
P90 (GWh - ore equivalenti)	61.4	1311.2