

**Progetto: Parco Eolico di Ferrandina (MT) – POTENZA COMPLESSIVA 32,9 MW**

**Report:** Studio Anemologico e calcolo di producibilità

**Cliente:** BEL TEAM srl  
Via Potenza 18  
85024 - Lavello (PZ)

**Autore:** Cristiano Paoletti

**Data:** 09 Novembre 2021

**Revisione:** Rev.1

## INTRODUZIONE

Il presente studio anemologico è un contributo scientifico integrativo finalizzato a fornire la caratterizzazione anemologica dell'area del Comune di Ferrandina (MT) nella quale è prevista la realizzazione di un parco eolico da parte della BEL Energia S.r.l., società di sviluppo, realizzazione e gestione di impianti per la produzione di energia elettrica da fonte eolica.

Il documento rappresenta il report relativo all'attività di analisi e di elaborazione dei dati anemometrici e studio di produzione energetica del progetto eolico sito nel Comune di Ferrandina svolta dallo scrivente per conto di BEL Energia S.r.l..

In particolare, il presente studio rappresenta l'analisi di produzione energetica, relativamente al layout di impianto proposto dal committente, del progetto eolico nel Comune di Ferrandina (MT), Regione Basilicata.

Lo studio è principalmente basato sulle seguenti informazioni e dati forniti allo scrivente dal committente:

- coordinate degli aerogeneratori secondo i layout forniti;
- caratteristiche tecniche e tipologia degli aerogeneratori di progetto.

Il presente documento ha lo scopo di supportare il Committente nelle sue valutazioni in ordine allo sviluppo ed all'eventuale finanziamento del progetto.

Nel corso dell'espletamento dell'incarico lo scrivente si è attenuto a quanto risultante dalla documentazione, dai contenuti, dai dati, dalle dichiarazioni e dalle informazioni fornite dal Committente, senza obbligo di accertamento della veridicità od autenticità degli stessi.

L'incarico affidato ha mero carattere consultivo, viene reso quale consulente indipendente, nell'interesse esclusivo del Committente; non prevede né costituirà lo svolgimento di attività obbligatoria, protetta o vincolante ai sensi di legge.

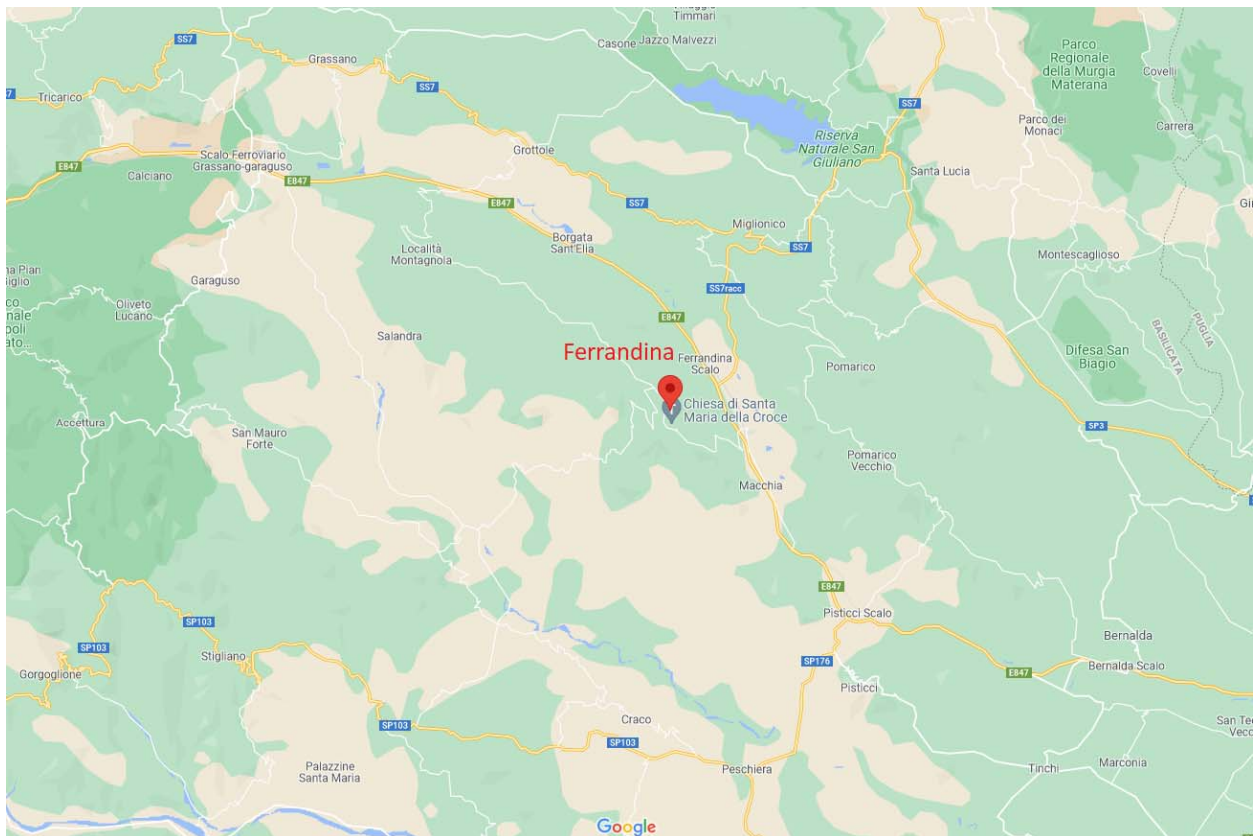
Lo scrivente declina ogni responsabilità per l'uso che verrà fatto dal cliente del presente documento, e per le conseguenze civili e penali che da tale uso potrebbero derivare.

## INDICE.

<b>1.</b>	<b>IDENTIFICAZIONE GEOGRAFICA DEL SITO</b> .....	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>IL PROGETTO EOLICO DI FERRANDINA</b> .....	<b>6</b>
2.1.	CONFIGURAZIONE D’IMPIANTO .....	6
2.2.	AEROGENERATORE SIEMENS GAMESA SG 155 4,7MW .....	8
<b>3.</b>	<b>LA BANCA DATI ANEMOMETRICA</b> .....	<b>9</b>
<b>4.</b>	<b>ANALISI ANEMOLOGICA E CALCOLO DELLA PRODUCIBILITA’</b> .....	<b>10</b>
4.1.	METODOLOGIA DI ANALISI CFD CON WINDSIM .....	10
4.2.	LA METODOLOGIA DI NESTING .....	12
4.3.	LA CLIMATOLOGY UTILIZZATA IN INPUT .....	13
4.3.1.	Gli anemometri di riferimento.....	13
4.3.2.	La velocità alla quota di hub .....	13
4.3.3.	La Discretizzazione della Rosa dei Venti .....	13
4.3.4.	Le Caratteristiche della Climatology .....	14
4.4.	RISORSA EOLICA DISPONIBILE.....	15
4.5.	RISULTATI DEL CALCOLO DI PRODUCIBILITÀ .....	15
<b>5.</b>	<b>VERIFICA DEI REQUISITI PRESCRITTI DAL P.I.E.A.R. DELLA BASILICATA</b> .....	<b>16</b>
5.1.	REQUISITI TECNICI MINIMI .....	16
5.1.1.	Punto a.....	16
5.1.2.	Punto b. ....	16
5.1.3.	Punto c. ....	16
5.1.4.	Punto d. ....	17

## 1. IDENTIFICAZIONE GEOGRAFICA DEL SITO

L'area di interesse è situata nella Regione Basilicata, in Provincia di Matera nel Comune di Ferrandina. Il territorio comunale si estende su una superficie di 218 km<sup>2</sup> e l'abitato principale sorge in collina a 482 m s.l.m. in Val Basento, sulla sponda occidentale dell'omonimo fiume Basento, nella parte centro-settentrionale della provincia. Per la sua altitudine, Ferrandina fa parte della media Collina materana. In **Figura 1** viene riportato l'inquadramento generale dell'area.



**Figura 1** – Inquadramento generale dell'area.

Il sito di interesse è collocato nella parte Ovest del territorio comunale di Ferrandina ad oltre 7 km dall'abitato (come mostrato in **Figura 2**) all'interno della zona delimitata a Ovest dalla Strada Provinciale 4 ed a Sud dalla Strada Provinciale Ferrandina-Stigliano.



**Figura 2** – Localizzazione del sito eolico (in colore rosa) su stralcio ortofotoplanimetrico.

Il sito eolico risulta essere privo di aree boschive ed è situato ad un'altitudine compresa tra i 150 m ed i 350 m s.l.m.: si estende su una grande zona collinare adibita ad uso agricolo, con assenza di ostacoli geomorfologici di rilievo presentando, pertanto, una buona esposizione ai venti provenienti da qualsiasi quadrante. Tale caratteristica, non sempre rinvenibile in un parco eolico, garantisce la massima efficienza dello sfruttamento della risorsa eolica. In **Figura 3** si riporta una rappresentazione fotografica delle caratteristiche orografiche e di vegetazione del sito eolico estratta da Google Earth.



**Figura 3** – Rappresentazione fotografica dell'orografia e rugosità tipiche del sito eolico.

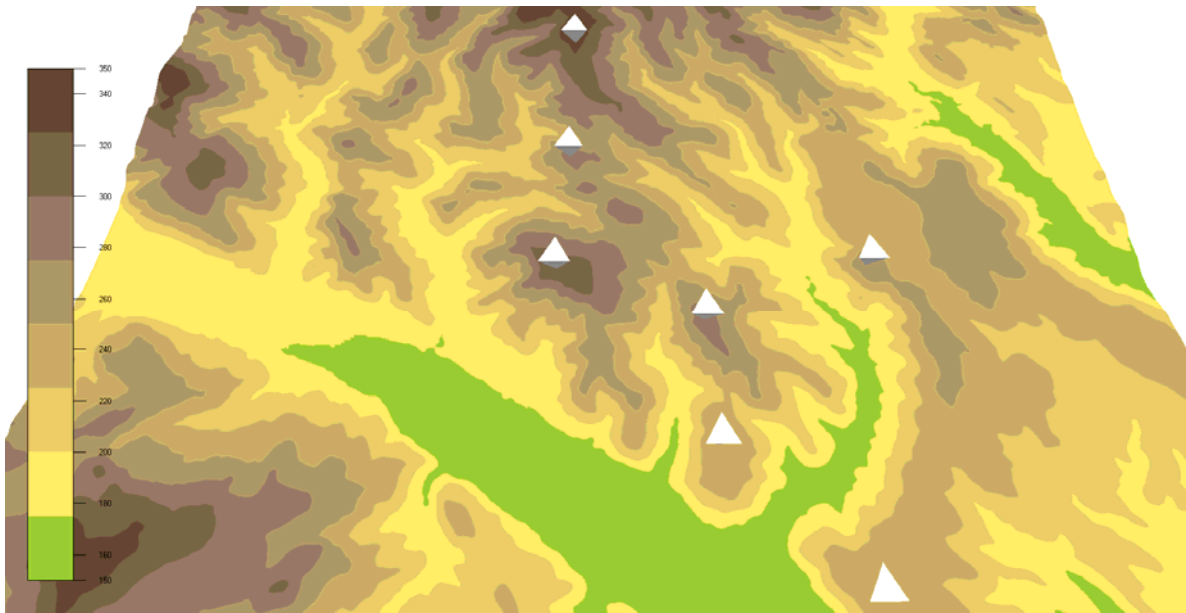
## 2. IL PROGETTO EOLICO DI FERRANDINA

### 2.1. CONFIGURAZIONE D'IMPIANTO

Il Progetto Eolico di Ferrandina oggetto del presente studio risulta ubicato nell'area descritta precedentemente e consta di 7 turbine eoliche del modello SiemensGamesa SG 155 V150 da 4,7MW di potenza unitaria con altezza mozzo pari a 123m (per un'altezza complessiva al tip di 200m) le cui coordinate sono riportate in **Tabella 1**. Nella successiva **Figura 4** viene mostrato il layout proposto su mappa orografica in falsi colori.

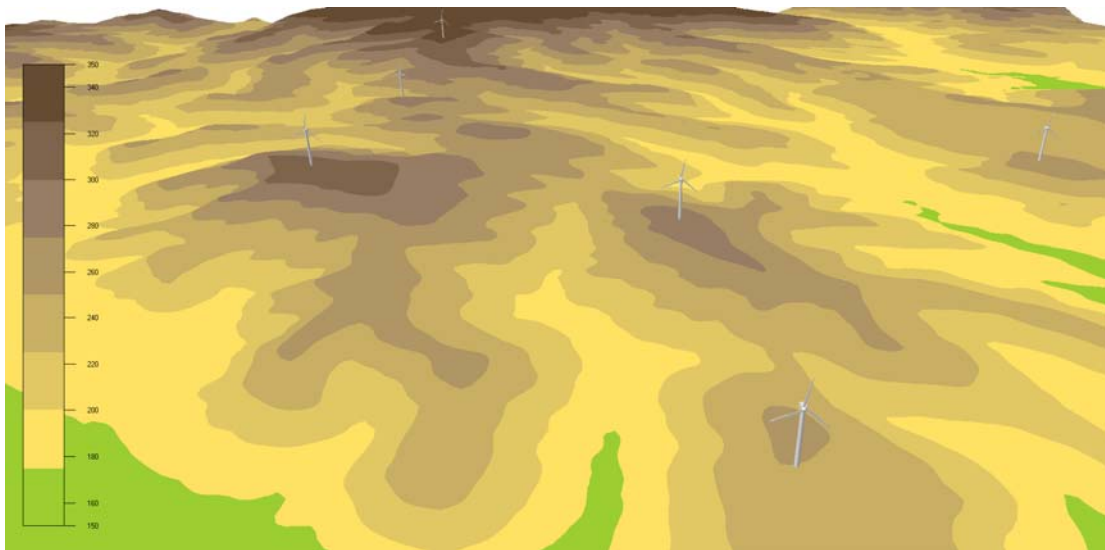
name	x	y	z	hub height
T1	615728	4478577	238	123
T2	615962	4480425	263	123
T3	615073	4479318	250	123
T4	615035	4480035	287	123
T5	614240	4480358	321	123
T6	614283	4481253	284	123
T7	614289	4482266	332	123

**Tabella 1** – Coordinate dei sette aerogeneratori previsti in WGS84 z33 e loro quota s.l.m.



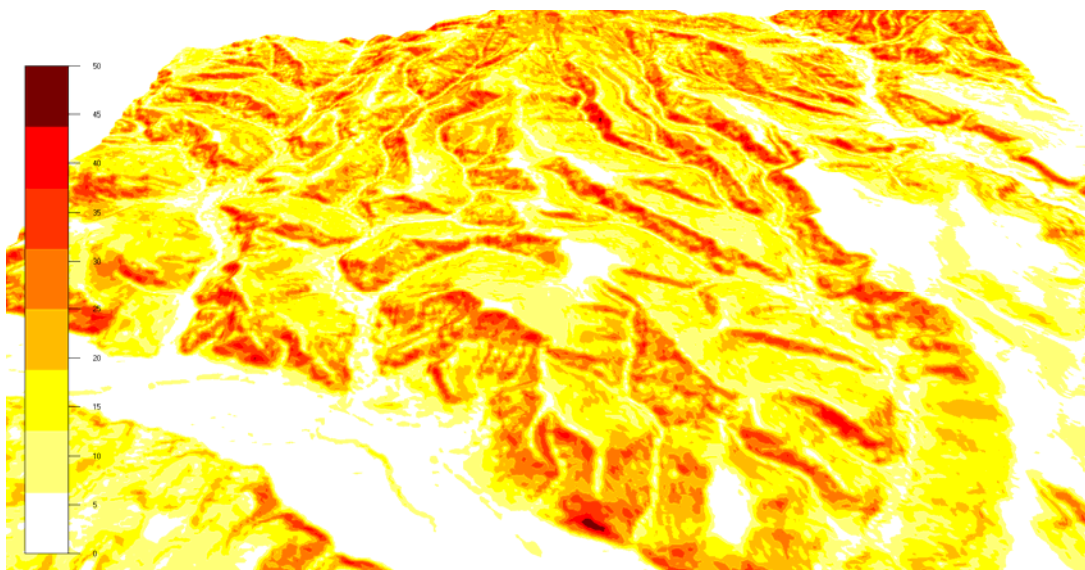
**Figura 4** – Layout delle 7 turbine su mappa orografica in falsi colori.

Nella successiva **Figura 5** viene mostrato il rendering dell'impianto dal punto di vista di un ideale osservatore in volo che guardi in direzione Nord.



**Figura 5** – Rendering dell'impianto eolico

Nella successiva **Figura 6** viene mostrata la mappa di inclinazione del sito eolico caratterizzata per la maggior parte da pendenze superiori ai 15° (colore giallo) e con notevole presenza di pendenze ancora maggiori (colori arancione e rosso) fino a valori di 50°. Tali pendenze non lasciano dubbi circa la complessità orografica del sito di Ferrandina.



**Figura 6** – Mappa delle inclinazioni del terreno in falsi colori (scala cromatica in gradi).

## 2.2. AEROGENERATORE SIEMENS GAMESA SG 155 4,7MW

Nel Parco Eolico di Ferrandina è prevista l'installazione di turbine eoliche del modello SiemensGamesa SG 155 da 4,7MW di potenza unitaria con altezza mozzo pari a 123m (per un'altezza complessiva al tip di 200m). In **Tabella 2** è riportata la curva di potenza e di spinta relativa alla densità standard dell'aria pari a 1,225 kg/m<sup>3</sup> per il modello di aerogeneratore considerato.

**Turbine: SG SG 4,7MW - 155 -**  
nominal effect (kW): 4700 - air  
density (kg/m<sup>3</sup>): 1.225

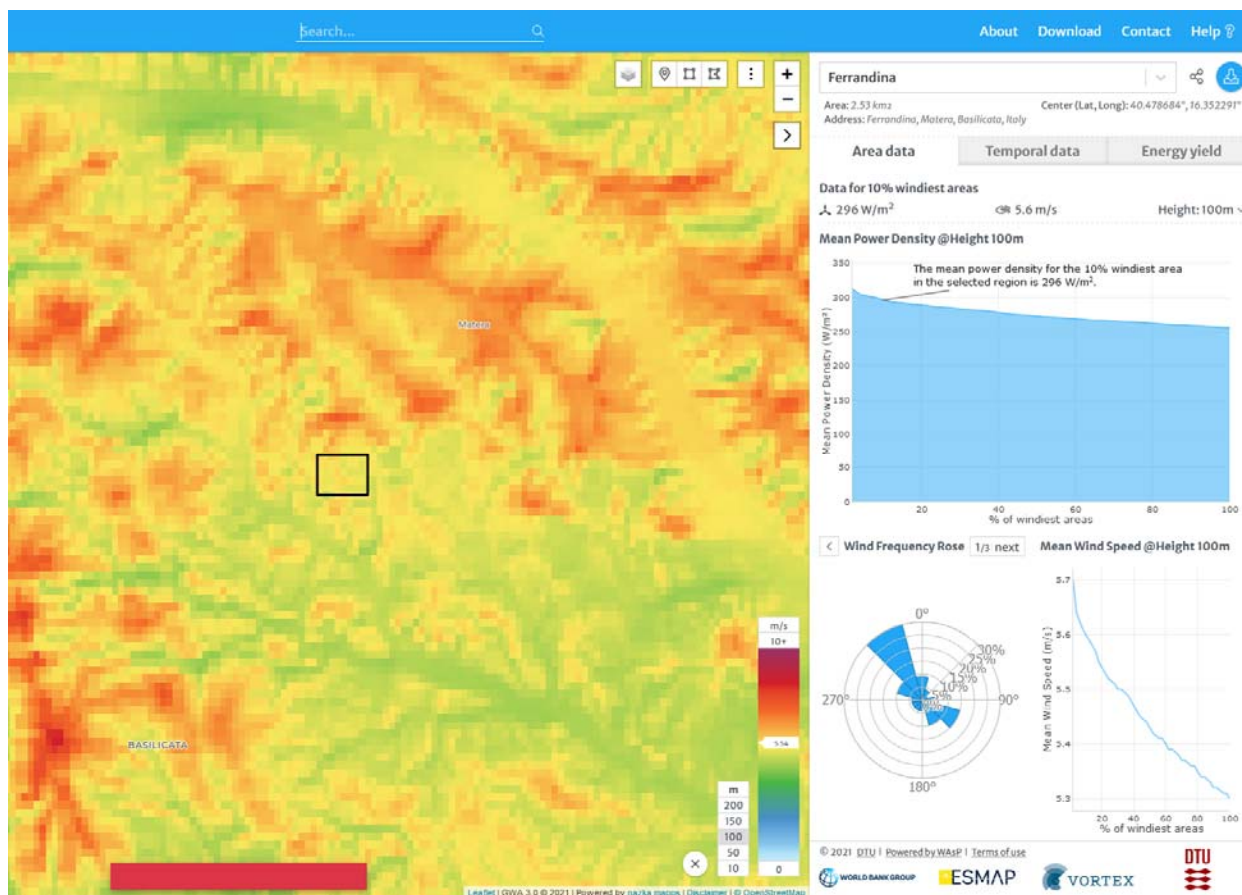
Bin velocity (m/s)	Power (kW)	Thrust coeff. (-)
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	44	0.912
4	243	0.833
5	592	0.810
6	1101	0.805
7	1804	0.806
8	2719	0.799
9	3723	0.734
10	4438	0.591
11	4674	0.434
12	4696	0.319
13	4700	0.244
14	4700	0.192
15	4700	0.156
16	4700	0.128
17	4699	0.107
18	4695	0.091
19	4683	0.078
20	4656	0.067
21	4549	0.058
22	4375	0.049
23	4207	0.043
24	4064	0.037
25	3956	0.033
26	3878	0.030
27	3821	0.027
28	0	0
29	0	0
30	0	0

**Tabella 2** – Curva di potenza e di spinta della turbina SG 155 4,7 MW.



### 3. LA BANCA DATI ANEMOMETRICA

Presso il sito eolico di Ferrandina non è stata condotta alcuna campagna anemometrica per mezzo di installazioni di torri di misura. La caratterizzazione anemometrica del sito è dunque stata condotta tramite il ricorso a dati disponibili presso banche dati pubbliche o comunque semi-pubbliche (previa registrazione gratuita). Nella fattispecie i dati anemometrici per il sito di Ferrandina sono stati rinvenuti presso il sito web GlobalWindAtlas come da screen shot riportato nella successiva **Figura 7**.



**Figura 7** – Screen shot per il sito di Ferrandina estratto dal sito web GlobalWindAtlas.

La **Figura 7** mostra un indicativo valore medio della velocità nell'area del sito di 5,6 m/s a 100m, ma non si riferisce ad un particolare punto. E' stato condotto, quindi, un esame software che ha permesso di ricavare il valore di **4,53 m/s** in corrispondenza di un anemometro virtuale da **25m** di altezza posizionato in prossimità del sito alle coordinate **614276 4482402** e di ricavare il valore di **5,23 m/s** in corrispondenza dello stesso punto, ma ad un'altezza di **50m**.

## 4. ANALISI ANEMOLOGICA E CALCOLO DELLA PRODUCIBILITA'

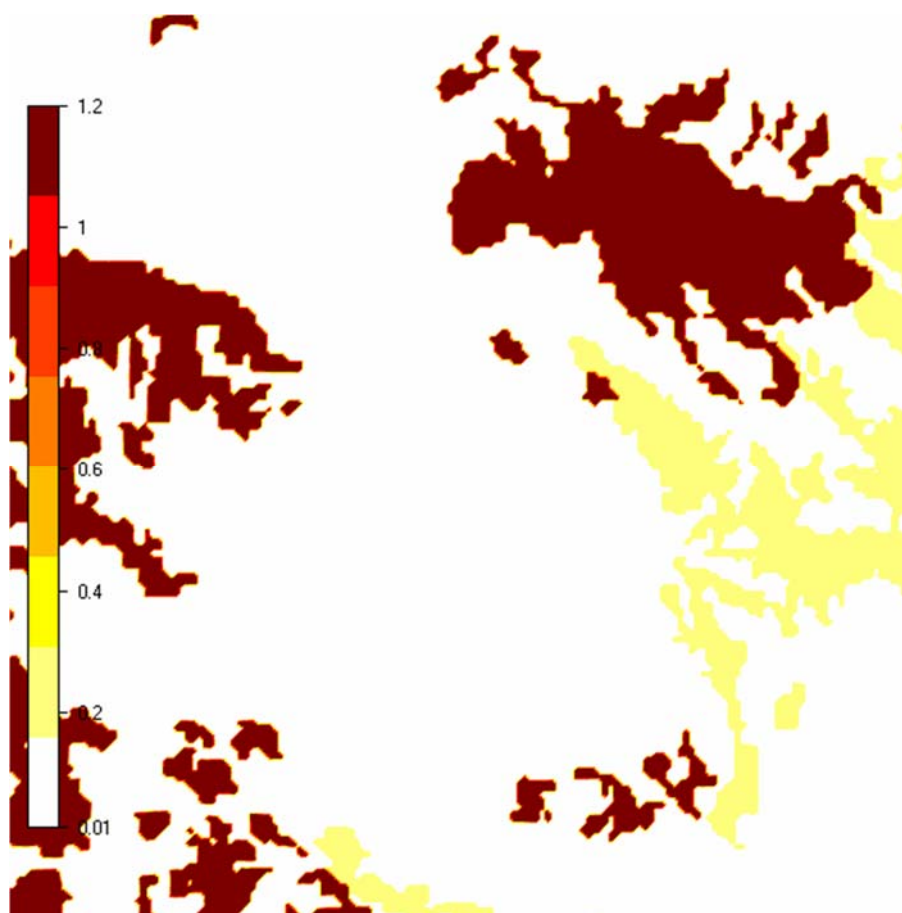
### 4.1. METODOLOGIA DI ANALISI CFD CON WINDSIM

Per ottenere l'estrapolazione orizzontale del campo di vento e la stima di produzione energetica attesa si è elaborato un modello Fluidodinamico Computazionale (CFD) che risolve le equazioni di Navier-Stokes agli elementi finiti. La Fluidodinamica Computazionale (CFD) non linearizza la complessa serie di equazioni differenziali delle leggi che governano numericamente la dinamica dei fluidi, quindi non introduce alcuna semplificazione o approssimazione (la qual cosa è invece fatta da altri modelli come quelli basati su Wasp ed utilizzata da software commerciali come WindPro): la soluzione viene cercata tramite procedimenti iterativi, dividendo il dominio geometrico tridimensionale in piccoli volumi comunemente noti come mesh, sino ad arrivare alla convergenza di tutto il modello.

Il modello CFD è stato implementato attraverso l'utilizzo del software commerciale WindSim. La caratteristica del software WindSim risiede nel poter simulare anche zone di ricircolo e di distacco della vena fluida dovuti ad esempio a forti variazioni della pendenza del suolo (come nel caso specifico del sito in esame) e che risultano impossibili da analizzare dai software non-CFD.

In pratica, una volta dati in input il modello orografico digitale del terreno (unitamente alle informazioni sulla rugosità del suolo), le varie climatologie e le caratteristiche delle turbine installate, il software calcola in output la mappa della risorsa eolica e la produzione media annua di lungo periodo attesa per il parco eolico discretizzata per i settori nei quali risulta essere stata suddivisa la rosa dei venti.

È, dunque, stato realizzato un modello orografico digitale che descrive l'andamento altimetrico dell'area geografica interessata dalla simulazione del campo di vento unitamente alle informazioni circa la rugosità superficiale del suolo. Il particolare della mappa orografica desunta dal modello digitale del terreno presso l'area di impianto è già stato mostrato in **Figura 4**. Nella **Figura 8** di pagina successiva viene mostrata la mappa di rugosità dell'area geografica interessata dalla simulazione del campo di vento mentre nella successiva **Tabella 3** sono riportate le classi di rugosità definite nell'area di impianto con l'indicazione del valore  $Z_0$  in metri.



**Figura 8** – Mappa della rugosità in falsi colori dell’area geografica interessata dalla simulazione del campo di vento raffigurante i diversi valori di  $Z_0$ .

Classe di Rugosità	Tipologia di Aree	$Z_0$ [m]
Classe 0	Mare, laghi ed altri specchi d'acqua	0.0008 - 0.001
Classe 1	Aree agricole aperte a declivo dolce	0.04
Classe 2	Terreni agricoli con pochi ostacoli ed uliveti	0.1
Classe 2	Vegetazione di macchia o a medio fusto	0.3
Classe 3	Villaggi o zone urbane	0.6
Classe 3	Foreste	0.8 - 1.2

**Tabella 3** – Classi di rugosità definite nell’area geografica interessata dalla simulazione del campo di vento.

## 4.2. LA METODOLOGIA DI NESTING

Il modello digitale orografico e di rugosità specificato nel paragrafo precedente è stato utilizzato come dato di partenza per la simulazione del campo di vento del sito, eseguita tramite il software WindSim. In particolare, si è eseguita a partire dall'area principale ("coarser") costituita da un dominio quadrato di 40 km di lato (centrato sul sito in esame) con grid di 100m (ovvero il massimo della risoluzione consentita dal software per tale estensione) la procedura di nesting descritta di seguito. La seguente **Tabella 4** riporta le principali caratteristiche di tale dominio iniziale.

	Min (m)	Max (m)	Extension (m)	Resolution Terrain Data (m)
Easting (m)	591610	630210	38600	100
Northing (m)	4465810	4505110	39300	100

	Easting	Northing	z	Total
Grid spacing (m)	100	100	Variable	-
Number of cells	386	393	30	4550940

**Tabella 4** – Caratteristiche del dominio iniziale ("coarser") per la simulazione CFD in coordinate WGS84 z33.

A partire da tale dominio iniziale si è operato un primo nesting per ottenere un dominio ristretto (sempre ovviamente centrato sul sito in esame) di 16 km di lato con grid spacing di 40m (ovvero il massimo della risoluzione consentita dal software per tale estensione) le cui principali caratteristiche sono riassunte nella seguente **Tabella 5**.

	Min (m)	Max (m)	Extension (m)	Resolution Terrain Data (m)
Easting (m)	603010	618810	15800	40
Northing (m)	4477210	4493010	15800	40

	Easting	Northing	z	Total
Grid spacing (m)	40	40	Variable	-
Number of cells	395	395	30	4680750

**Tabella 5** – Caratteristiche del primo nesting per la simulazione CFD in coordinate WGS84 z33.

Successivamente, si è operato un secondo ed ultimo nesting a partire dal primo per ottenere il dominio rettangolare ulteriormente ristretto di 6 km di lato rappresentato con risoluzione 15m (ovvero il massimo della risoluzione consentita dal software per tale estensione) le cui principali caratteristiche sono riassunte nella seguente **Tabella 6**.

	Min (m)	Max (m)	Extension (m)	Resolution Terrain Data (m)
Easting (m)	611643	617613	5970	15
Northing (m)	4477923	4483878	5955	15

	Easting	Northing	z	Total
Grid spacing (m)	15	15	Variable	-
Number of cells	398	397	30	4740180

**Tabella 6** – Caratteristiche del secondo nesting per la simulazione CFD in coordinate WGS84 z33.

### 4.3. LA CLIMATOLOGY UTILIZZATA IN INPUT

#### 4.3.1. *Gli anemometri di riferimento*

Come unico anemometro di riferimento si è utilizzato un anemometro virtuale da 50m di altezza posizionato in prossimità del sito alle coordinate 614276 4482402 ricavato a partire dai dati desunti dal sito GlobalWindAtlas.

#### 4.3.2. *La velocità alla quota di hub*

Si è lasciato al software il compito di estrapolare il profilo verticale più opportuno in corrispondenza di ogni turbina a partire dalla quota di 50m dell'anemometro virtuale e fino ai 123m previsti di quota hub.

#### 4.3.3. *La Discretizzazione della Rosa dei Venti*

Non essendoci particolari motivazioni si è ritenuto opportuno utilizzare una comune discretizzazione della rosa dei venti in 12 settori.

#### 4.3.4. Le Caratteristiche della Climatology

Si riportano nella successiva **Tabella 7** le caratteristiche principali della climatology in input al software WindSim costruita sulla base delle considerazioni fin qui svolte.

site name	virtual50m											
filename	virtual50											
measurement period	17/10/2008 08:10 - 01/07/2012 01:10								# records = 186949			
position	x = 614276.0				y = 4482402.0				z (agl) = 50.0			
Weibull param	k = 1.54				A = 5.96				average = 5.23			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.92	2.03	1.23	1.51	1.51	1.51	1.43	1.66	1.73	1.09	1.91	2.24
A	6.07	4.91	2.59	3.08	4.56	3.69	3.50	4.73	6.83	4.02	6.42	8.86
freq	5.7	3.0	2.9	9.1	16.4	5.7	3.1	3.0	4.0	3.5	14.0	29.6
mean	5.22	4.09	2.36	2.69	4.09	3.20	3.06	4.01	5.64	3.99	5.52	7.73

**Tabella 7** – Caratteristiche della climatology in input al software WindSim relativa all’anemometro di riferimento.

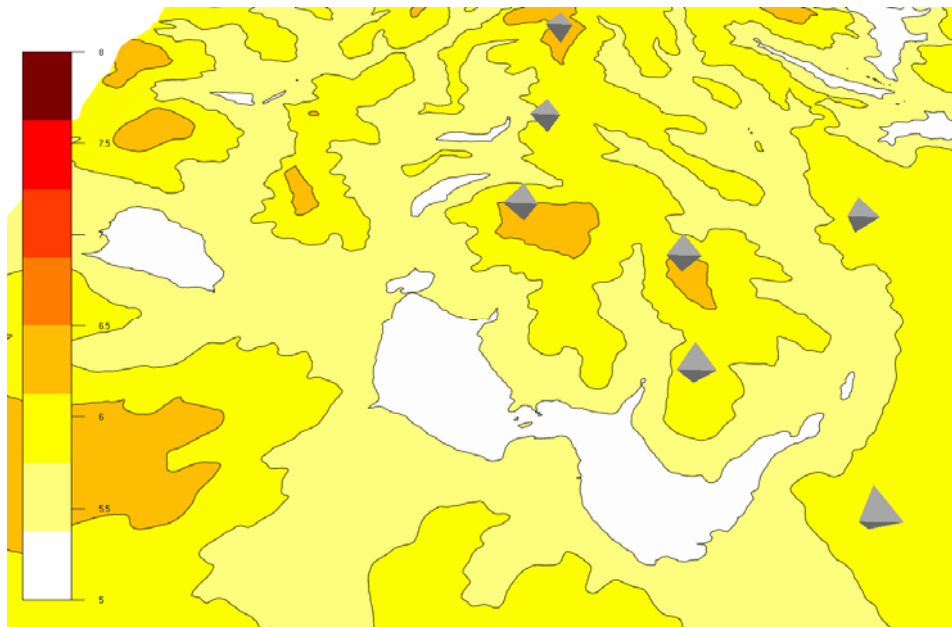
Per una migliore comprensione della climatology vengono proposti nella successiva **Tabella 8** gli stessi parametri con una differente forma di rappresentazione che evidenzia la presenza delle “calme” come categoria a se stante.

Direction Sector	Valid Data Points	Recovery Rate (%)	Frequency (%)	Mean m/s	Median m/s	Min m/s	Max m/s	Std. Dev. m/s	Weibull k	Weibull c	Mean Power Density W/m2
1 345° - 15°	10,206	100	5.79	5.497	5.21	0.5	20.89	2.918	1.947	6.187	200
2 15° - 45°	5,034	100	2.86	4.513	4.52	0.5	12.92	2.378	1.935	5.068	105
3 45° - 75°	4,397	100	2.49	2.793	2.35	0.5	15.65	1.977	1.496	3.108	40
4 75° - 105°	15,388	100	8.73	2.957	2.65	0.5	16.79	1.807	1.738	3.331	39
5 105° - 135°	29,286	100	16.61	4.292	3.77	0.5	26.75	2.653	1.708	4.826	120
6 135° - 165°	9,508	100	5.39	3.531	3.16	0.5	18.94	2.198	1.690	3.966	67
7 165° - 195°	4,913	100	2.79	3.521	3.12	0.5	14.34	2.276	1.600	3.935	67
8 195° - 225°	5,007	100	2.84	4.476	4.25	0.5	16.74	2.714	1.672	5.005	122
9 225° - 255°	6,754	100	3.83	6.215	6.20	0.5	31.11	3.873	1.596	6.909	341
10 255° - 285°	5,721	100	3.25	4.464	3.23	0.5	26.74	3.645	1.271	4.829	200
11 285° - 315°	25,316	100	14.36	5.732	5.43	0.5	25.36	3.202	1.845	6.446	235
12 315° - 345°	54,767	100	31.07	7.847	7.60	0.5	25.25	3.737	2.194	8.842	513
calme	10,652										
All data	186,949	100	100	5.231	4.6	0.42	31.11	3.673	1.39	5.713	260

**Tabella 8** – Parametri della velocità del vento per settori di direzione.

#### 4.4. RISORSA EOLICA DISPONIBILE

Si riporta nella successiva **Figura 9** la mappa isovento alla quota di hub di 123m della zona di layout (con indicazione della posizione degli aerogeneratori di progetto) prodotta in output dal software WindSim a seguito della simulazione effettuata.



**Figura 9** – Mappa isovento a 123m di quota con indicazione della posizione degli aerogeneratori di progetto.

#### 4.5. RISULTATI DEL CALCOLO DI PRODUCIBILITÀ

Nella successiva **Tabella 9** sono riassunti i risultati del calcolo di producibilità prodotti in output dal software WindSim per tutte le turbine previste.

name	power (kW)	hub height (m)	density (kg/m**3)	power density (W/m**2)	gross AEP (MWh/y)	wind speed with wake (m/s)	AEP with wake losses (MWh/y)	wake loss (%)	full load hours (h)	Ev (kWh/y m3)
T1	4700	123	1.182	367	13947	6.04	13233	5.1	2816	0.153
T2	4700	123	1.179	375	14029	6.07	13646	2.7	2903	0.158
T3	4700	123	1.181	351	13734	5.96	12980	5.5	2762	0.150
T4	4700	123	1.176	395	14545	6.22	13727	5.6	2921	0.159
T5	4700	123	1.172	419	14878	6.34	14405	3.2	3065	0.167
T6	4700	123	1.176	371	14012	6.07	13698	2.2	2914	0.158
T7	4700	123	1.171	395	14498	6.21	14424	0.5	3069	0.167
All	32900	-	-	-	99643	-	96114	3.5	2921	0.159
Mean	-	-	1.177	382	-	6.13	-	-	-	-

**Tabella 9** – Risultato del calcolo di producibilità.

## 5. VERIFICA DEI REQUISITI PRESCRITTI DAL P.I.E.A.R. DELLA BASILICATA

Lo studio anemologico di cui alla presente relazione è stato condotto nel rispetto di tutti i requisiti tecnici minimi prescritti al punto 1.2.1.3. dell'Appendice A della stessa L.R. sopra riportata così come modificata sulla base dell'Art. 27 della L.R. 30 aprile 2014 n. 7.

Di seguito, il contenuto del suddetto P.I.E.A.R. è riportato testualmente tramite passaggi virgolettati.

### 5.1. REQUISITI TECNICI MINIMI

“I progetti per la realizzazione di impianti eolici di grande generazione, per essere esaminati ai fini dell'autorizzazione unica di cui all'art.12 del D.lgs 387/2003, è necessario che, indipendentemente dalla zona in cui ricadono, soddisfino i seguenti vincoli tecnici minimi:”

#### 5.1.1. Punto a.

“Velocità media annua del vento a 25 m dal suolo non inferiore a 4 m/s”.

In corrispondenza dell'anemometro virtuale considerato ai fini del calcolo di producibilità si calcola una ventosità media a 25 m dal suolo di 4,53 m/s, superiore quindi al valore limite di 4 m/s.

Esito: verificato.

#### 5.1.2. Punto b.

“Ore equivalenti di funzionamento dell'aerogeneratore non inferiori a 2.000 ore”.

Nella **Tabella 9** sono stati riportati i valori delle ore equivalenti di funzionamento per ciascun aerogeneratore. I suddetti valori risultano tutti superiori alle 2.000 ore.

Esito: verificato.

#### 5.1.3. Punto c.

“Densità volumetrica di energia annua unitaria non inferiore, per ogni singolo aerogeneratore, a 0,15 kWh/(anno·mc), come riportato nella formula seguente:

$$E_v = \frac{E}{18D^2 H} \geq 0,15 \left[ kWh / (anno \cdot m^3) \right]$$



Dove:

E = energia prodotta dalla turbina (espressa in kWh/anno);

D = diametro del rotore (espresso in metri);

H = altezza totale dell'aerogeneratore (espressa in metri), somma del raggio del rotore e dell'altezza da terra del mozzo”.

Nella **Tabella 9** sono mostrati i valori della densità volumetrica di energia annua unitaria per ciascun aerogeneratore. I suddetti valori risultano tutti superiori al prescritto valore limite di 0,15.

Esito: verificato.

#### **5.1.4. Punto d.**

“Numero massimo di aerogeneratori: 30 (10 nelle aree di valore naturalistico, paesaggistico ed ambientale).”.

Il numero complessivo di aerogeneratori previsti risulta pari a 7 e dunque inferiore al numero massimo previsto.

Esito: verificato.