



Engineering & Construction



WE ENGINEERING

EGP CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15012.00.028.00

PAGE

1 di/of 21

TITLE: Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità

AVAILABLE LANGUAGE: IT

IMPIANTO EOLICO CARBONIA

VALUTAZIONE RISORSA EOLICA E ANALISI DI PRODUCIBILITÀ

Il Tecnico

Ing. Leonardo Sblendido

File: GRE.EEC.R.73.IT.W.15012.00.028.00_Valutazione risorsa eolica a analisi di producibilità.pdf

00	15/12/2021	PRIMA EMISSIONE	G. Alfano	E. Speranza	L. Sblendido
REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED

EGP VALIDATION

	A. Durante	A. Puosi
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROGETTO / IMPIANTO CARBONIA	EGP CODE																		
	GROUP	FUNCION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT			SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION							
	GRE	EEC	R	7	3	I	T	W	1	5	0	1	2	0	0	0	2	8	0
CLASSIFICATION	UTILIZATION SCOPE																		

This document is property of Enel Green Power S.p.A. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power S.p.A.



Engineering & Construction



WE ENGINEERING

EGP CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15012.00.028.00

PAGE

2 di/of 21

INDICE

1. PREMESSA	3
1.1 CONTENUTI DELLA RELAZIONE	4
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE	4
3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA.....	7
4. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO.....	13
5. MODELLO DI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA	15
6. RISULTATI	21

1. PREMESSA

La società Green&Green S.r.l., in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da Enel Green Power Italia S.r.l. di redigere il progetto definitivo per la realizzazione di un nuovo impianto eolico denominato "Impianto eolico Portoscuso" e delle opere connesse, da ubicarsi nel comune di Carbonia (SU).



Figura 1-1: Inquadramento su ortofoto delle WTG di impianto

Le opere in progetto si riferiscono a:

- installazione di 7 nuovi aerogeneratori per una potenza installata pari a 42 MW;
- realizzazione delle fondazioni per gli aerogeneratori in progetto;



Engineering & Construction



WE ENGINEERING

EGP CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15012.00.028.00

PAGE

4 di/of 21

- realizzazione di piazzole di montaggio degli aerogeneratori, di nuovi tratti di viabilità e l'adeguamento della viabilità esistente, al fine di garantire l'accesso per il trasporto degli aerogeneratori;
- realizzazione del cavidotto di media tensione e della sottostazione da collegare in antenna a 220 kV sulla futura Stazione Elettrica (SE) di Smistamento 220 kV della RTN da inserire in entra – esce alla linea RTN a 220 kV “Sulcis - Oristano”.
- utilizzo temporaneo, attraverso opportuni adeguamenti, dell'area per il Site Camp.

Il progetto è in linea con gli obiettivi nazionali ed europei per la riduzione delle emissioni di CO₂ legate a processi di produzione di energia elettrica.

L'impianto sarà destinato a funzionare in parallelo alla rete elettrica nazionale in modo da immettere energia da fonte rinnovabile in rete; l'iniziativa oltre a contribuire al potenziamento della produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile su territorio nazionale sarà a servizio dei futuri fabbisogni energetici comunali.

1.1 CONTENUTI DELLA RELAZIONE

La presente relazione costituisce il documento sulla valutazione della risorsa eolica e sull'analisi di producibilità riguardante i nuovi aerogeneratori che sono previsti in sito.

Il capitolo 2 descrive in generale il sito e il layout degli aerogeneratori di nuova costruzione.

Nel capitolo 3 vengono descritte le caratteristiche anemologiche del sito.

Il capitolo 4 illustra le caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore di riferimento e il capitolo 5 tratta del modello di analisi di producibilità.

Infine, il capitolo 6 riporta i risultati dell'analisi di producibilità.

2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area di impianto è individuabile sulla Cartografia IGM in scala 1:25000 al foglio:

- Foglio 555-III Portoscuso

Di seguito si riporta uno stralcio cartografico dell'area di interesse:

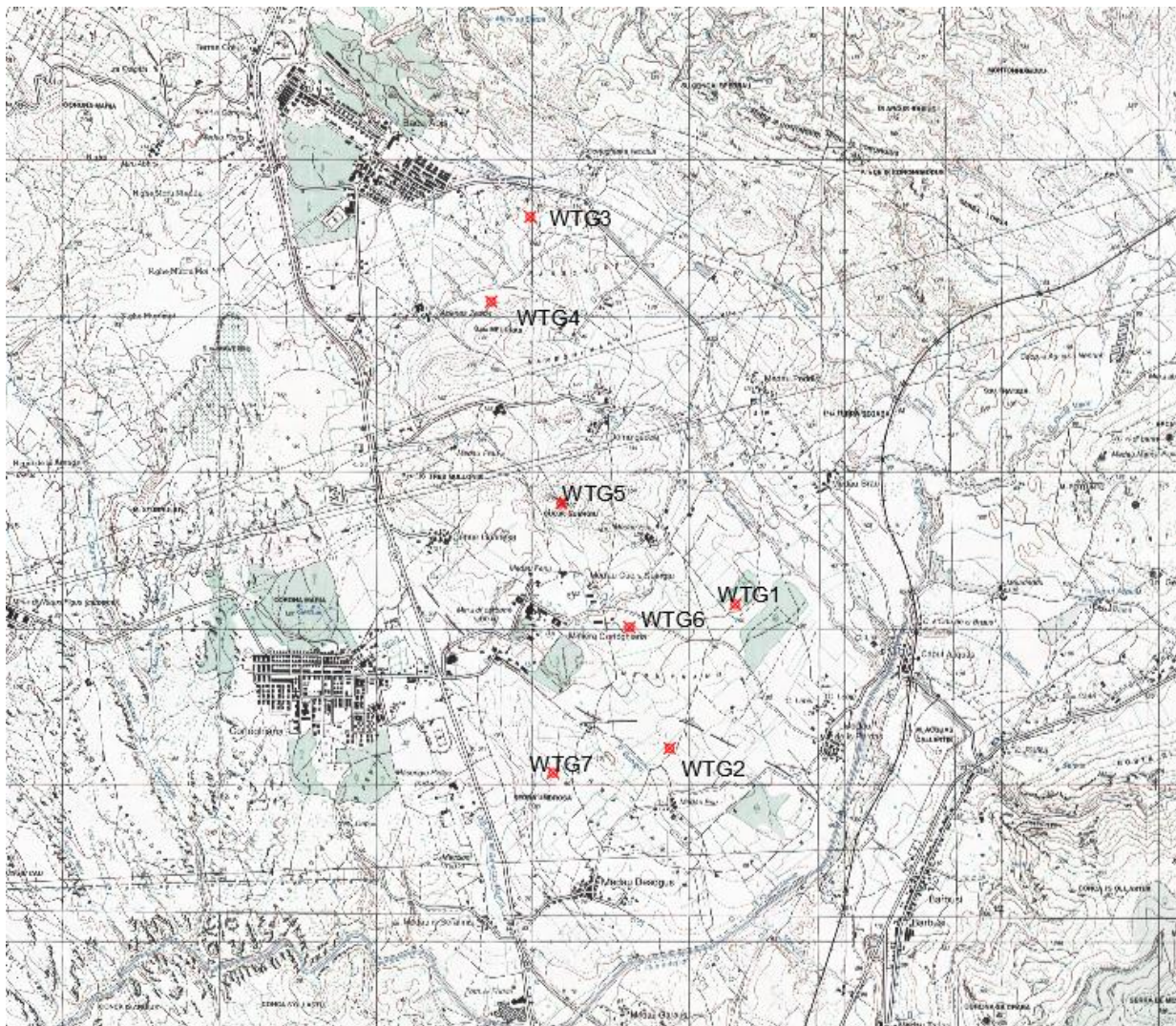


Figura 2-1: Inquadramento su base IGM (WTG indicate con puntatore di colore rosso)

L'impianto eolico dista circa 1,1 km dal centro abitato di Cortoghiana (Comune di Carbonia - SU), 515 m dal centro abitato di Bacu Abis (Comune di Carbonia – SU), 4 km dal centro abitato di Carbonia (SU).

La morfologia dell'area e delle zone limitrofe è contraddistinta da un territorio collinare a bassa-moderata pendenza. Tranne la WTG P05, posta sulla sommità di una cresta, le restanti WTG sono ubicate in contesto di pendii poco acclivi.

Di seguito l'inquadramento su base ortofoto delle WTG.

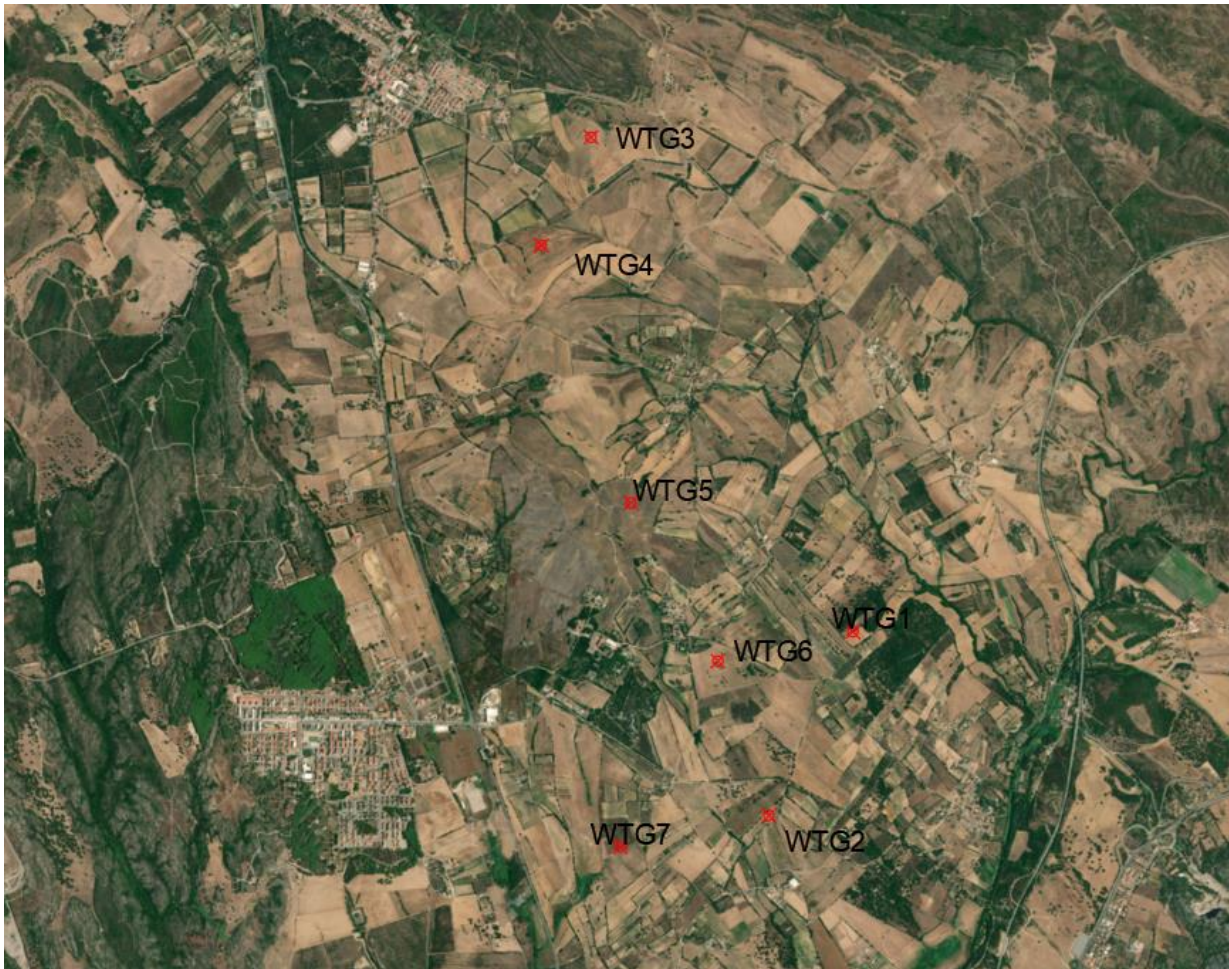


Figura 2-2: Inquadramento su base ortofoto delle WTG.

Di seguito è riportato in formato tabellare un dettaglio sul posizionamento degli aerogeneratori in progetto, in coordinate WGS84 UTM fuso 32N:

WTG	Comune	Est [m]	Nord [m]	Altitudine [m.s.l.m.]
P01	Carbonia	456221.70	4340968.52	98.98
P02	Carbonia	455800.85	4340047.95	89.00
P03	Carbonia	454909.54	4343447.92	148.01
P04	Carbonia	454659.43	4342906.05	150.41
P05	Carbonia	455109.00	4341615.00	203.75
P06	Carbonia	455545.11	4340821.28	112.00
P07	Carbonia	455056.20	4339890.96	81.00

Tabella 2-1: Coordinate degli aerogeneratori

3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

La società pubblica di ricerca RSE (Ricerca Sistema Energetico), società per azioni il cui unico socio è la società Gse (Gestore dei Servizi Energetici), controllata dal ministero Sviluppo Economico specializzata nella ricerca nel settore elettrico-energetico, ha implementato l'Atlante eolico d'Italia nell'ambito della Ricerca di Sistema (<http://atlanteeolico.rse-web.it/>), che consiste in una serie di mappe di velocità del vento: le mappe di velocità del vento sono state redatte su tre serie di 27 tavole, con scala a nove colori. Ciascun colore identifica una classe di velocità i cui estremi, in m/s, sono indicati in calce alla tavola stessa. Ad esempio il colore giallo indica aree con valori stimati di velocità del vento comprese tra 5 e 6 m/s; l'assenza di colore indica velocità medie inferiori a 3 m/s.

Secondo quanto emerge dallo studio della RSE, l'Italia risulta una nazione con buone potenzialità in termini di risorsa per lo sviluppo dell'eolico. La risorsa eolica in Italia è prevalentemente concentrata nel Centro-Sud e nelle isole maggiori.

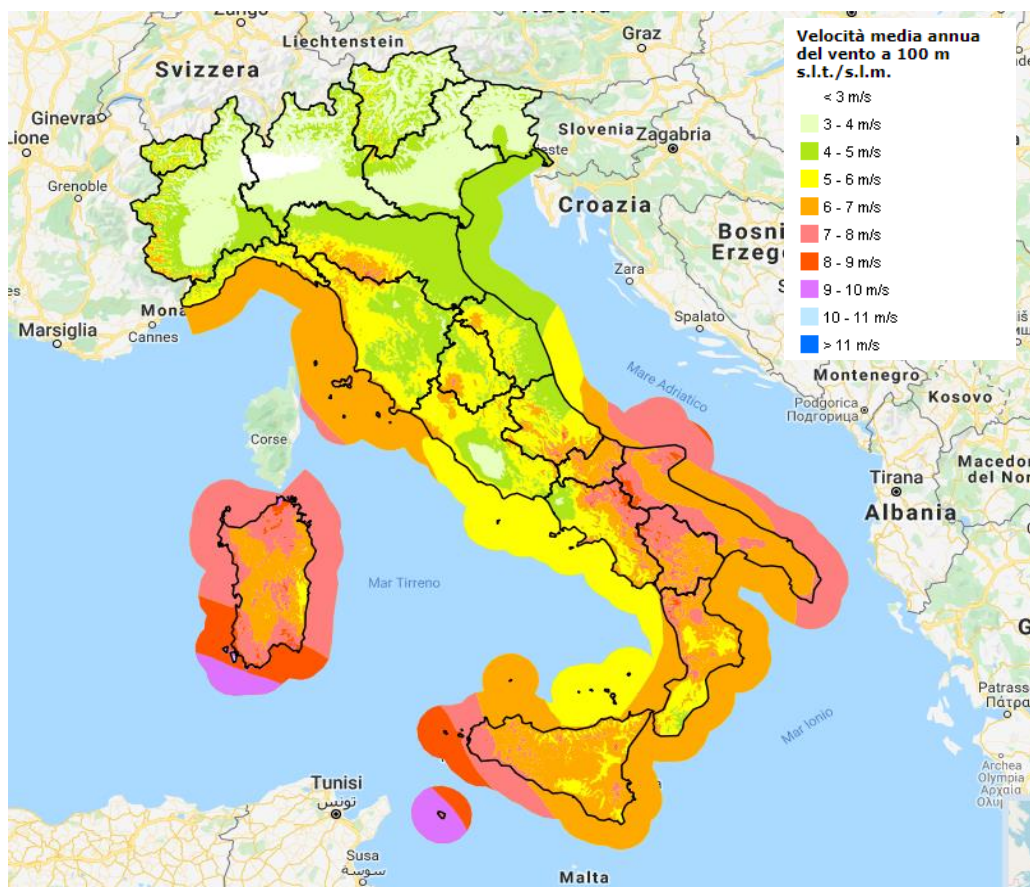


Figura 3-1: Atlante Eolico d'Italia –Velocità media annua del vento a 100 m s.l.t./s.l.m. Fonte: RSE-Web

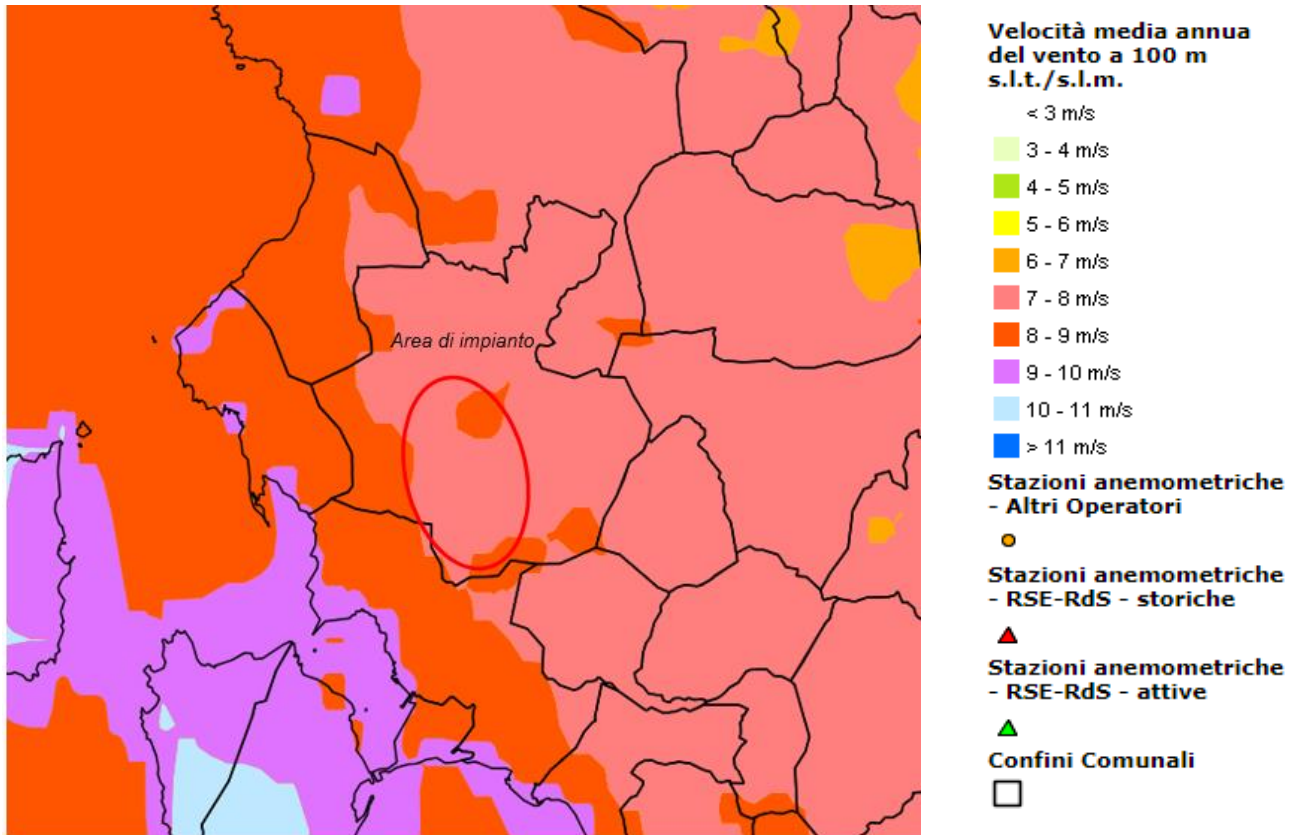


Figura 3-2: Localizzazione sito di intervento (in rosso) sull'Atlante Eolico d'Italia – Velocità media annua del vento a 100 m s.l.t./s.l.m. Fonte: RSE-Web

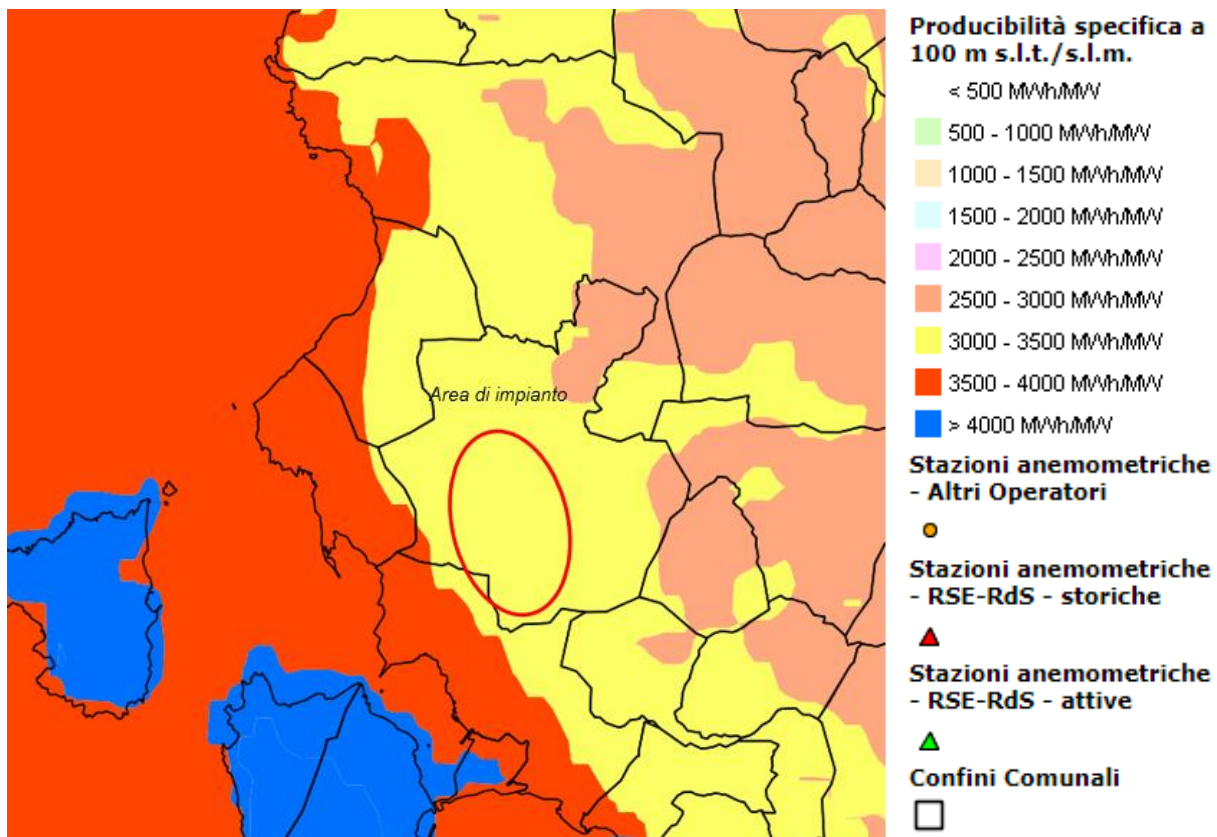


Figura 3-3: Localizzazione sito di intervento (in rosso) sull'Atlante Eolico d'Italia – Producibilità specifica a 100 m s.l.t./s.l.m. Fonte: RSE-Web

L'impianto ricade in un'area caratterizzata da differenti velocità medie annue: 7-8 m/s e 8-9 m/s (valori rilevati a 100 m di altezza). Tuttavia, il potenziale eolico della zona di impianto risulta il medesimo, compreso tra 3000 e 3500 ore equivalenti.

Questi dati, individuati considerando l'Atlante eolico, vengono approfonditi nei paragrafi a seguire attraverso l'analisi anemologica in sito, riportando le analisi effettuate sulla base di rilevazioni anemologiche effettuate da alcuni anemometri nella zona di interesse.

La velocità e la direzione del vento sono misurate in sito tramite la stazione anemometrica esistente di "8428 – Sa Xia Manna", situata a circa 4 km a Sud dell'impianto, ad un'altitudine pari a 50 m s.l.m. come mostrato in figura:

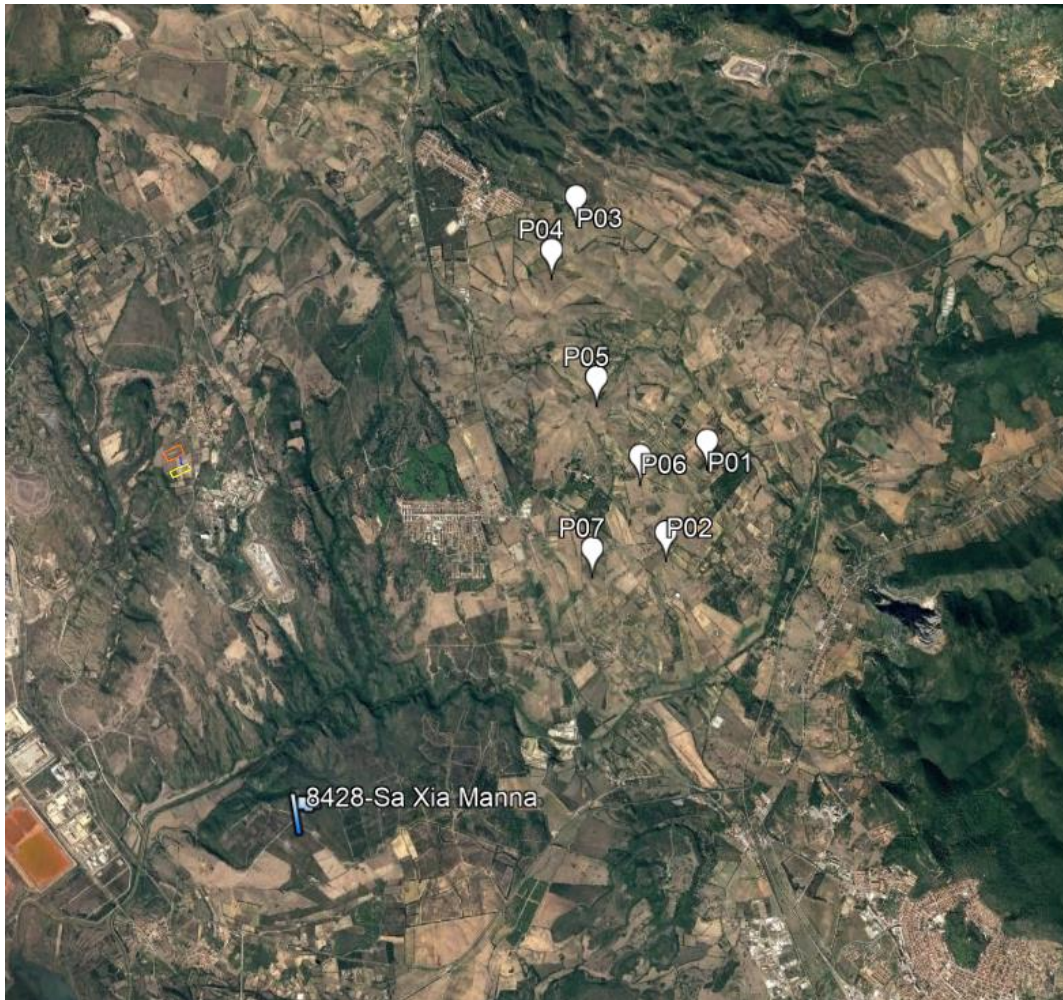


Figura 3-4: Inquadramento stazione anemometrica “8428 – Sa Xia Manna”

Variable	Value	Variable	Value
Latitude	39.183769	Mean temperature	16.69 °C
Longitude	8.446135	Mean pressure	1,009.4 mbar
Elevation	0 m	Mean air density	1.201 kg/m ³
Start date	21/06/2009 00:10	Power density at 50m	190 W/m ²
End date	18/03/2012 19:20	Wind power class	1 (Poor)
Duration	33 months	Power law exponent	0.258
Length of time step	10 minutes	Surface roughness	0.665 m
Calm threshold	0.4 m/s	Roughness class	3.57

Tabella 3-1: Dati stazione anemometrica “8428 – Sa Xia Manna”

La stazione anemometrica misura la direzione del vento e la sua velocità, necessaria per il calcolo della stima di producibilità. La stazione misura, inoltre, la temperatura ambiente che determina la densità dell'aria, altra variabile nella stima di producibilità.

La velocità media mensile e la direzione del vento misurate dalla stazione anemometrica sono riportate nelle figure sottostanti per il periodo di 33 mesi di dati (inizio rilevazione 21/06/2009, fine rilevazione 18/03/2012). Gli esiti della caratterizzazione sono riportati sotto forma di diagrammi e tabelle.

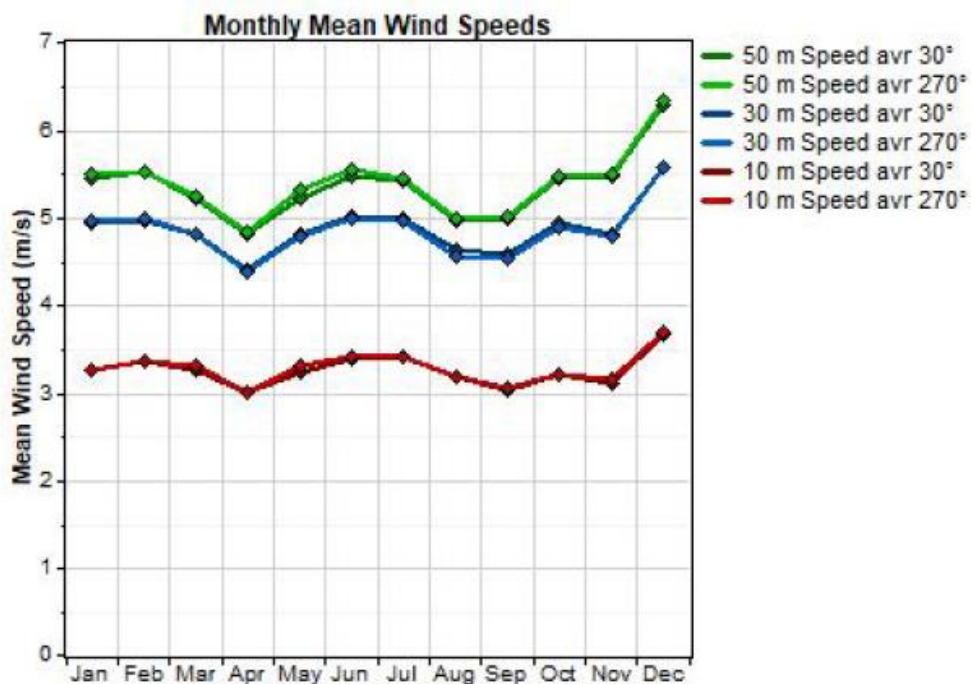


Figura 3-5: Profilo medio mensile di velocità del vento alla stazione anemometrica

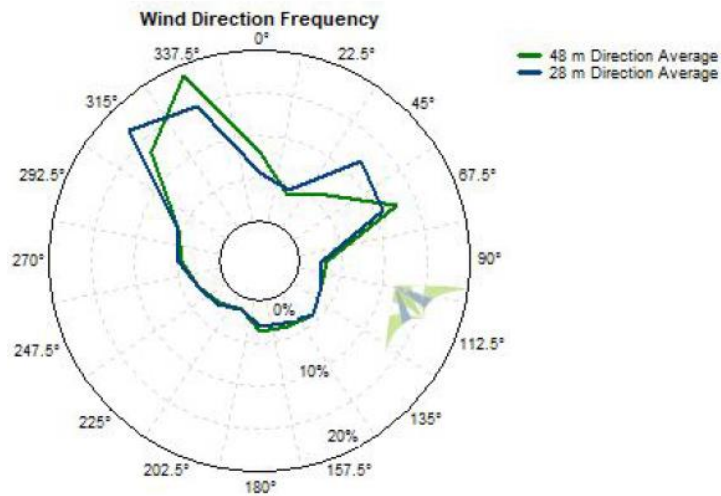


Figura 3-6: Direzione prevalente vento alla stazione anemometrica

Come visibile dalle figure precedenti, la velocità del vento è misurata ad altezze diverse della stazione anemometrica, a 50, 30 e 10 metri da terra. La tripla misura di velocità è necessaria al fine di individuare quale sia la variazione della velocità del vento in funzione dell'altezza, per poi modellare la velocità del vento all'altezza del mozzo dell'aerogeneratore, come illustrato con maggiore dettaglio nel successivo capitolo.

La direzione del vento è prevalente nella direzione Nord. Questo fattore è molto importante nell'ambito della progettazione di impianti eolici, al fine di individuare il migliore posizionamento degli aerogeneratori ed evitare effetti di scia tra essi.

Nelle figure seguenti si evidenziano i profili diurni ed il profilo verticale della velocità, da cui si può valutare quale sia la variazione della velocità del vento in funzione dell'altezza dal suolo:

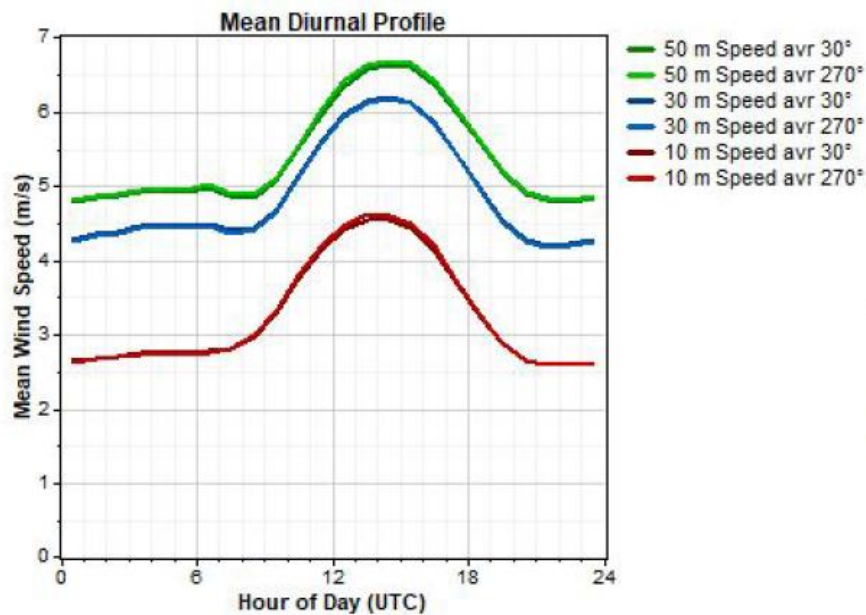


Figura 3-7: Profilo medio giornaliero di velocità del vento alla stazione anemometrica

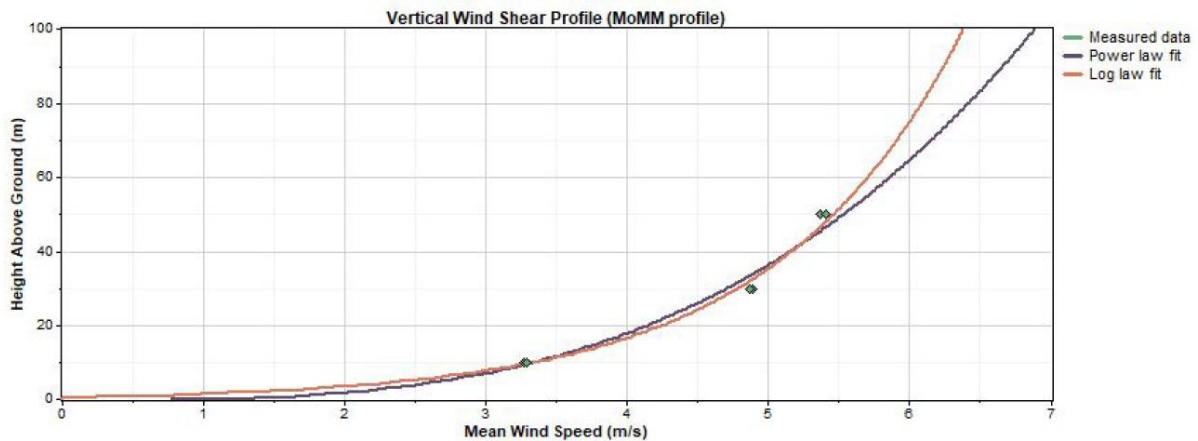


Figura 3-8: Profilo verticale del vento alla stazione anemometrica

Il sito è caratterizzato da ottimi valori di velocità del vento, che garantiscono un'elevata producibilità del sito.

4. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO

Gli aerogeneratori che verranno installati nel nuovo impianto di Portoscuso saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste

sarà pari a massimo 6,0 MW. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati in seguito della fase di acquisto della macchina e verranno descritti in dettaglio in fase di progettazione esecutiva.

Si riportano di seguito le principali caratteristiche tecniche di un aerogeneratore con potenza nominale pari a 6,0 MW:

Potenza nominale	6,0 MW
Diametro del rotore	170 m
Lunghezza della pala	83,5 m
Corda massima della pala	4,5 m
Area spazzata	22.698 m ²
Altezza al mozzo	115 m
Classe di vento IEC	IIIA
Velocità cut-in	3 m/s
V nominale	11 m/s
V cut-out	25 m/s

Tabella 4-1: Caratteristiche tecniche aerogeneratore

Nell'immagine seguente è rappresentata una turbina con rotore di diametro pari a 170 m e potenza fino a 6,0 MW:

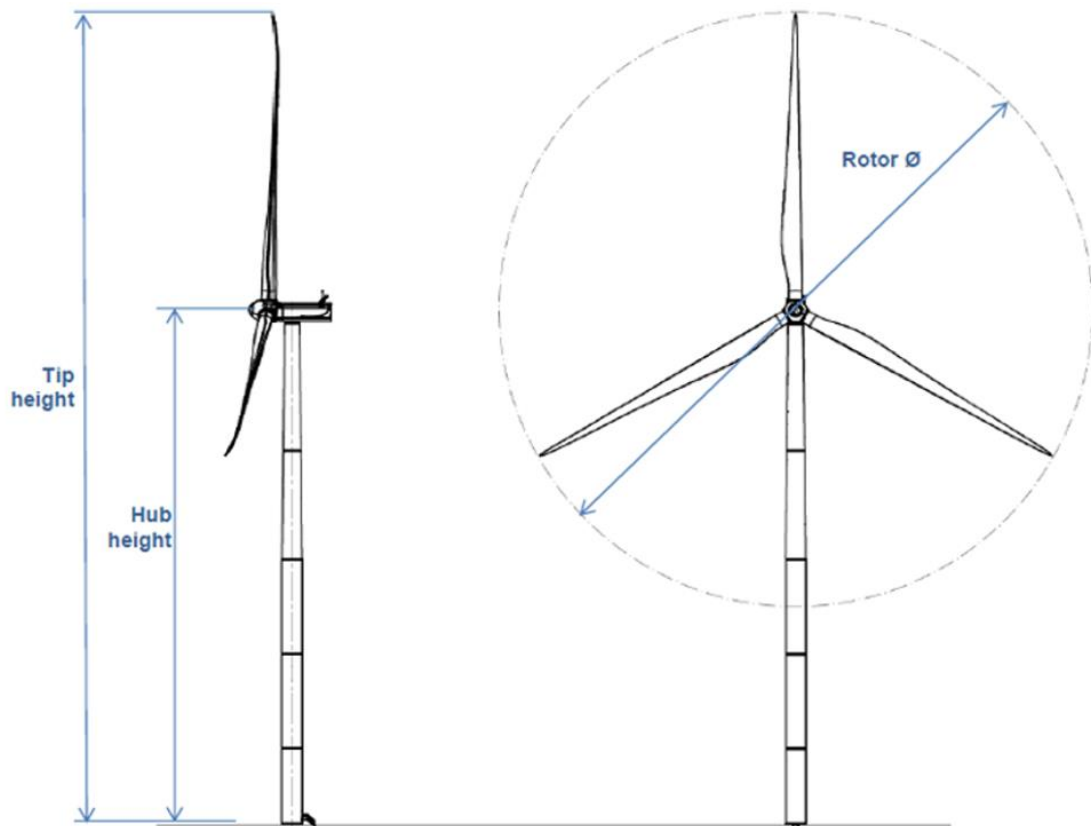


Figura 4-1: Vista e caratteristiche di un aerogeneratore da 6,0 MW

TabellaErrore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato.-2 - Dimensioni aerogeneratore

Altezza della punta (Tip height)	200 m
Altezza del mozzo (Hub height)	115 m
Diametro del rotore (Rotor \varnothing)	170 m

Ogni aerogeneratore è equipaggiato di generatore elettrico asincrono, di tipo DFIG (Directly Fed Induced Generator) che converte l'energia cinetica in energia elettrica ad una tensione nominale di 690 V. È inoltre presente su ogni macchina il trasformatore MT/BT per innalzare la tensione di esercizio da 690 V a 33 kV.

5. MODELLO DI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA

In questo capitolo si affronta lo studio del modello per la valutazione della risorsa eolica e per l'analisi di producibilità riferito all'aerogeneratore di riferimento descritto al capitolo 4.



Engineering & Construction



WE ENGINEERING

EGP CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.15012.00.028.00

PAGE

16 di/of 21

Il primo passo per la valutazione della risorsa è lo studio della velocità del vento all'altezza del mozzo dell'aerogeneratore. La velocità del vento è strettamente legata alla quota a cui essa è registrata, secondo la legge seguente:

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^\alpha$$

Dove:

- v_0 è la velocità del vento misurata alla quota z_0 ;
- v è la velocità che vuole essere identificata alla quota z (ad esempio all'altezza del mozzo);
- α è un coefficiente che correla la differenza di quota alla differenza di velocità del vento.

Come visibile dalla formula, il calcolo della velocità del vento all'altezza del mozzo può essere determinata a partire da una misura di velocità ad una quota conosciuta e dall'individuazione del coefficiente α .

Le misure del vento alle quote di riferimento sono quelle riportate al capitolo 3, registrate presso la stazione anemometrica "8428 – Sa Xia Manna". Come già evidenziato, la stazione misura la velocità del vento a quote differenti: 50, 30 e 10 metri. Questo permette di poter identificare il coefficiente α tra queste tre quote e applicarlo poi per l'identificazione della velocità del vento all'altezza del mozzo dell'aerogeneratore.

Dall'analisi effettuata per l'altezza di mozzo pari a 115 metri, sono ottenuti i seguenti grafici di velocità e direzione del vento all'altezza del mozzo:

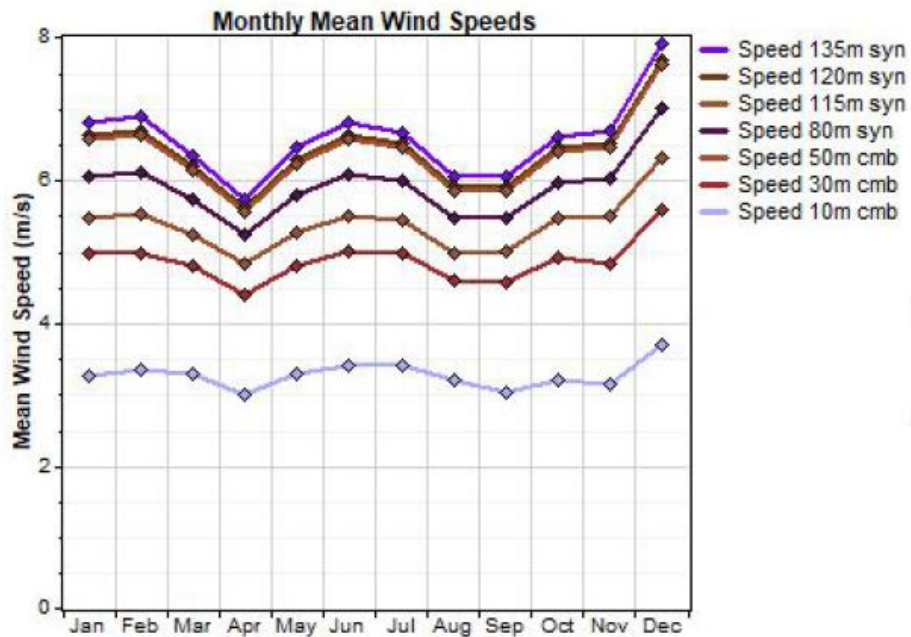


Figura 5-1: Profilo medio mensile di velocità del vento all'altezza del mozzo

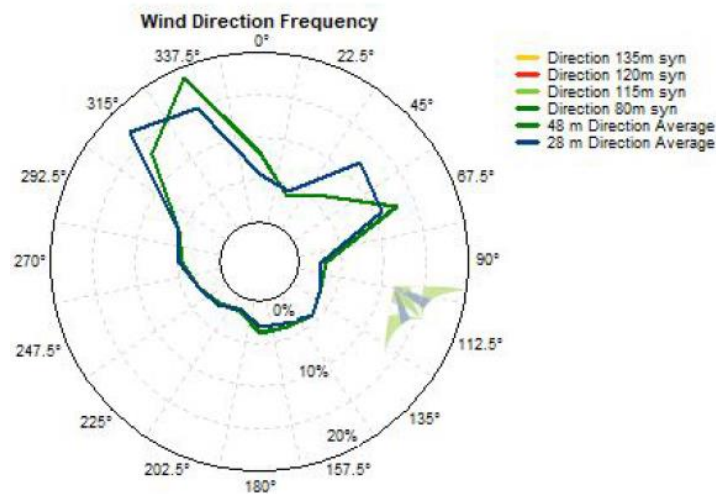


Figura 5-2: Direzione prevalente vento all'altezza di mozzo

Sono riportati di seguito anche il grafico del profilo medio diurno di velocità del vento ed il profilo verticale esteso all'altezza di mozzo:

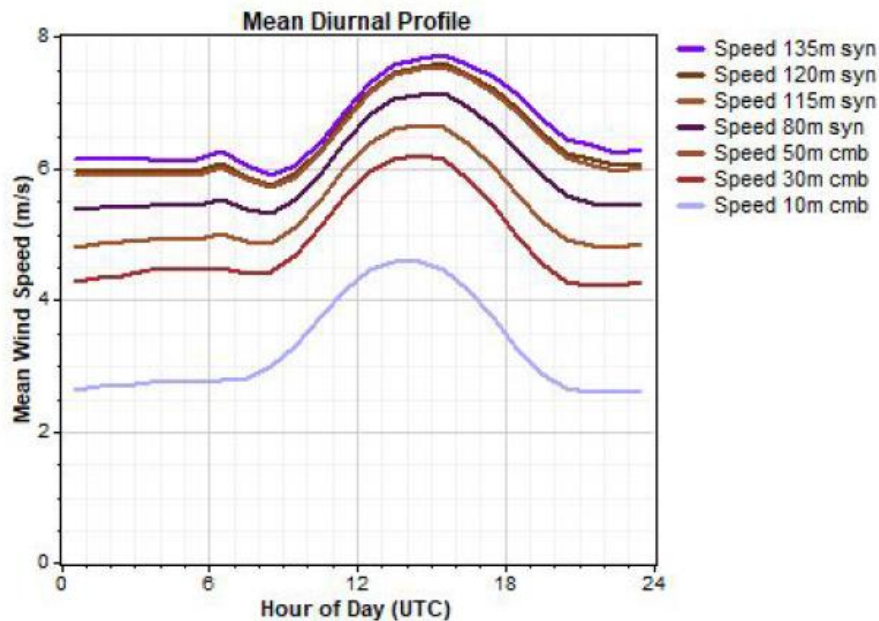


Figura 5-3: Profilo medio giornaliero di velocità del vento all'altezza del mozzo

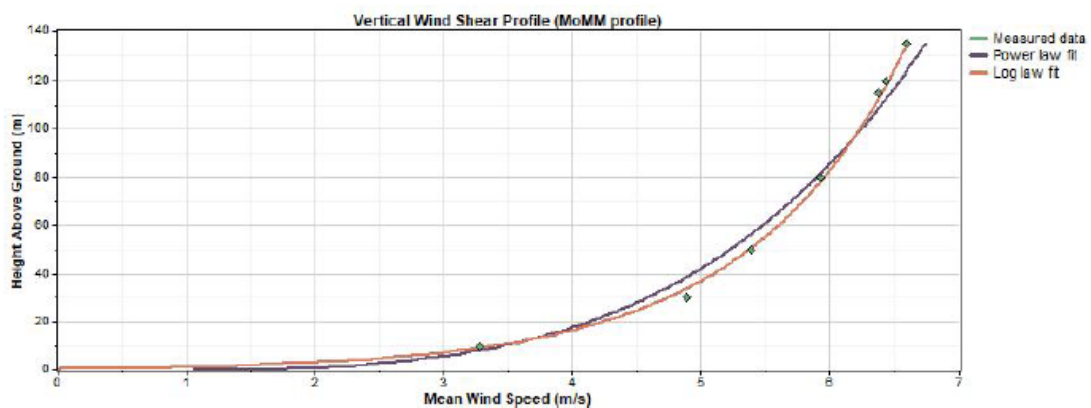


Figura 5-4: Profilo verticale di velocità fino all'altezza di mozzo

Dal profilo di velocità del vento è possibile ottenere una distribuzione di frequenza della velocità del vento per il calcolo della producibilità. La distribuzione di frequenza consente di identificare il numero di ore all'anno in cui si registra ciascun range di velocità del vento e calcolare quindi la relativa energia prodotta.

La distribuzione ideale che meglio descrive il comportamento della velocità del vento in un dato sito è la distribuzione probabilistica di Weibull, di cui è riportata la funzione di densità di probabilità sotto:

$$f(v) = \left(\frac{k}{A}\right) \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}$$

Dove:

- v è la velocità del vento;
- $f(v)$ è la distribuzione di frequenza che indica la probabilità di avere una data velocità del vento;
- k e A rappresentano rispettivamente il parametro di forma e il parametro di scala.

k è un parametro adimensionale che indica la distribuzione utilizzata ed è minore di 2 quando si tratta di una distribuzione di tipo Weibull. A è un parametro con unità dimensionale di m/s, così come la velocità del vento: solitamente il parametro A è stimabile sapendo che la velocità media del vento è circa pari a $0,9 \cdot A$. I valori di k e A sono stimabili, in modo più preciso, attraverso una serie di modelli: modello grafico, modello MOM (methods of moments), modello empirico o modello energetico equivalente.

Attraverso lo studio dei dati misurati in sito è possibile ottenere quale sia la distribuzione Weibull che meglio descrive l'andamento della velocità del vento. La distribuzione di Weibull è identificata in figura seguente:

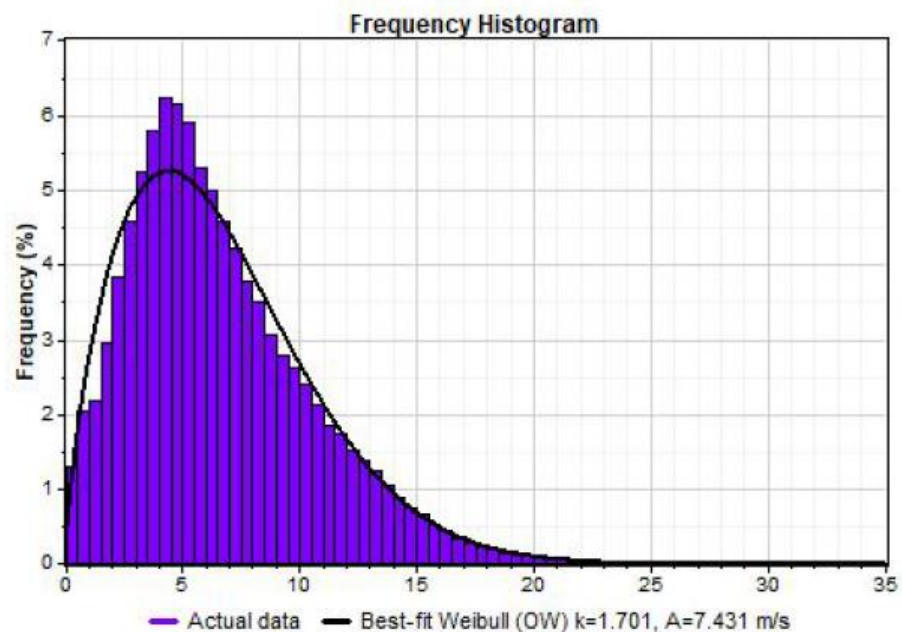


Figura 5-5: Distribuzione di Weibull

Si ottiene quindi una distribuzione probabilistica di velocità durante l'anno. È dunque possibile calcolare l'energia prodotta dall'aerogeneratore moltiplicando, per ogni classe di vento, la potenza prodotta dall'aerogeneratore in quella condizione di vento, ricavata dalla curva di potenza, ed il numero di ore all'anno in cui si verifica quella condizione di vento, ottenibili come il prodotto tra le ore totali in un anno (8760) e la probabilità che vi sia quella condizione di vento ($f(v)$ da distribuzione Weibull).

L'energia specifica del flusso d'aria e la sua direzione sono riportate nella figura seguente:

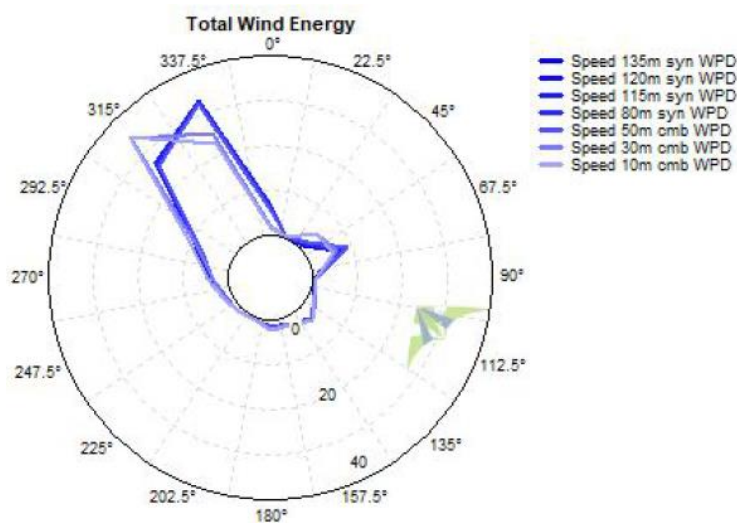


Figura 5-6: Energia dal vento

Non è possibile, tuttavia, calcolare l'energia prodotta da tutto il parco eolico come l'energia prodotta da un aerogeneratore moltiplicata per il numero di aerogeneratori. Infatti, vi sono diverse interazioni tra gli aerogeneratori, che riducono il valore di energia prodotta totale dal campo: effetti di scia e effetti di "schiera", dovuti alla presenza di numerose turbine che condizionano il vento, anche fuori dall'area di scia.

La modellazione ed il calcolo della producibilità per l'intero parco eolico sono stati effettuati attraverso il software di progettazione e di ottimizzazione di impianti eolici "Openwind", tramite l'impiego del modello "Deep Array Eddy Viscosity Model".

L'utilizzo di un modello di tipo "wake" (scia) è necessario poiché per impianti eolici composti da numerose turbine non è possibile ipotizzare che non vi sia correlazione tra i vari aerogeneratori e che la presenza di un aerogeneratore non possa influenzare il vento circostante e le prestazioni degli altri aerogeneratori. La presenza di numerose turbine eoliche in un'area limitata può alterare il profilo

del vento anche al di fuori della zona di scia, riducendo così il valore totale di energia prodotta.

6. RISULTATI

La modellazione illustrata al capitolo precedente ha condotto ai seguenti risultati:

Caratteristica	Valore
Potenza Installata	42 MW
Potenza nominale WTG	6,0 MW
N° di WTG	7
Classe IEC	IIIa
Diametro del rotore	170 m
Altezza del mozzo	115 m
Velocità media del vento all'altezza del mozzo (free)	6,3 m/s
Energia prodotta annua P50	101185 MWh
Ore equivalenti P50	2409

Tabella 6-1: Risultati stima di producibilità

È stato riportato il percentile P50. Esso rappresenta il valore a cui corrisponde il 50% di probabilità di ottenere, nella realtà, un valore maggiore o uguale a quello riportato.

Al percentile riportato, si stima che l'impianto eolico potrà produrre 101,1 GWh all'anno, per un totale di 2409 ore equivalenti. Come già evidenziato, il sito è caratterizzato da ottimi valori di ventosità che garantiscono un'elevata producibilità.

Il Tecnico

Ing. Leonardo Sblendido

