



Green Power

Engineering &amp; Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.12420.00.016.02

PAGE

1 di/of 16

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

# INTEGRALE RICOSTRUZIONE DELL'IMPIANTO EOLICO DI NICOSIA

## PROGETTO DEFINITIVO

### Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità

File: GRE.EEC.R.73.IT.W.12420.00.016.02 - Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
02	10/07/2024	<b>Integrazioni MASE</b>	M. Carnevale	S. Bossi	P. Polinelli
01	15/07/2020	<b>Modifica HHub</b>	N. Novati	N. Novati	L. Lavazza
00	03/07/2020	<b>Prima emissione</b>	D. Gradogna	N. Novati	L. Lavazza

#### GRE VALIDATION

<i>Bellorini (GRE)</i>	<i>Ruocco (GRE)</i>	<i>Iaciofano (GRE)</i>
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY

PROJECT / PLANT <b>Nicosia</b>	GRE CODE																		
	GROUP	FUNCION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT				SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION						
	<b>GRE</b>	<b>EEC</b>	<b>R</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>I</b>	<b>T</b>	<b>W</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0</b>
CLASSIFICATION	<b>PUBLIC</b>				UTILIZATION SCOPE	<b>BASIC DESIGN</b>													

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



GRE CODE

**GRE.EEC.R.73.IT.W.12420.00.016.02**

PAGE

2 di/of 16

## INDEX

1. INTRODUZIONE .....	3
1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE.....	3
1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE .....	3
2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	3
3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA .....	6
4. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO .....	11
5. MODELLO DI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA.....	13
6. RISULTATI .....	16

## 1. INTRODUZIONE

Stantec S.p.A., in qualità di Consulente Tecnico, è stata incaricata da Enel Green Power S.p.A. ("EGP") di redigere il progetto definitivo per il potenziamento dell'esistente impianto eolico ubicato nei comuni di Nicosia (EN) e Mistretta (ME), in località "Contrada Marrocco", costituito da 55 aerogeneratori di potenza nominale pari a 0,85 MW, per una potenza totale installata di 46,75 MW.

L'energia prodotta dagli aerogeneratori, attraverso il sistema di cavidotti interrati in media tensione, viene convogliata alla sottostazione elettrica di alta tensione "Serra Marrocco" 150 kV, realizzata in entra-esce sulla linea Nicosia-Caltanissetta. La suddetta stazione elettrica è ubicata all'interno dell'area dell'impianto eolico.

Il progetto proposto prevede l'installazione di nuove turbine eoliche in sostituzione delle esistenti, in linea con gli standard più alti presenti sul mercato, e consentirà di ridurre il numero di macchine da 55 a 13, per una nuova potenza installata prevista pari a 78 MW, diminuendo in questo modo l'impatto visivo, in particolare il cosiddetto "effetto selva". Inoltre, la maggior efficienza dei nuovi aerogeneratori comporterà un aumento considerevole dell'energia specifica prodotta, riducendo in maniera proporzionale la quantità di CO<sub>2</sub> equivalente.

### 1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE

Enel Green Power S.p.A., in qualità di soggetto proponente del progetto, è la società del Gruppo Enel che dal 2008 si occupa dello sviluppo e della gestione delle attività di generazione di energia da fonti rinnovabili.

Enel Green Power è presente in 29 Paesi nel mondo: in 18 gestisce delle capacità produttive mentre in 11 è impegnata nello sviluppo e costruzione di nuovi impianti. La capacità gestita totale è di circa 46 GW, corrispondenti a più di 1.200 impianti.

In Italia, il parco di generazione di Enel Green Power è rappresentato da tutte le 5 tecnologie rinnovabili del gruppo: idroelettrico, eolico, fotovoltaico, geotermia e biomassa. Attualmente nel Paese conta una capacità gestita complessiva di oltre 14 GW.

### 1.2. 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

Il sito, oggetto del presente elaborato, è ubicato a circa 80 km a Sud-Est di Palermo ed a qualche km ad Est delle Madonie, nei comprensori comunali di Nicosia (EN) e Mistretta (ME), Regione Sicilia.

L'area interessata si sviluppa lungo il crinale della dorsale ad andamento O-E, che si estende tra Serra Marrocco, Monte Ferrante, Monte Quattro Finaite e località Portella Palumba (a sud di Monte Saraceno) per una lunghezza di circa 6 Km, e lungo i due crinali delle dorsali ad andamento Sud-Nord, che si estendono da Serra Marocco per una lunghezza di circa 1 Km e tra Monte della Grassa e Monte Quattro Finaite per una lunghezza di circa 3 Km.

L'impianto in progetto ricade entro i confini comunali di Nicosia e Mistretta, in particolare all'interno dei seguenti riferimenti cartografici:

- Foglio di mappa catastale del Comune di Nicosia n° 1, 3, 4 e 5;

- Foglio di mappa catastale del Comune di Mistretta n° 96;
- Foglio di mappa catastale del Comune di Castel di Lucio n° 36;
- Foglio di mappa catastale del Comune di Geraci Siculo n° 57;
- Fogli I.G.M. in scala 1:25.000, codificati 260-I-SO Castel di Lucio e 260-II-NO Ganci;
- Carta tecnica regionale CTR in scala 1:10.000, foglio n° 610160.

Di seguito è riportato l'inquadramento territoriale dell'area di progetto e la configurazione proposta su ortofoto.



**Figura 2-1: Inquadramento generale dell'area di progetto**



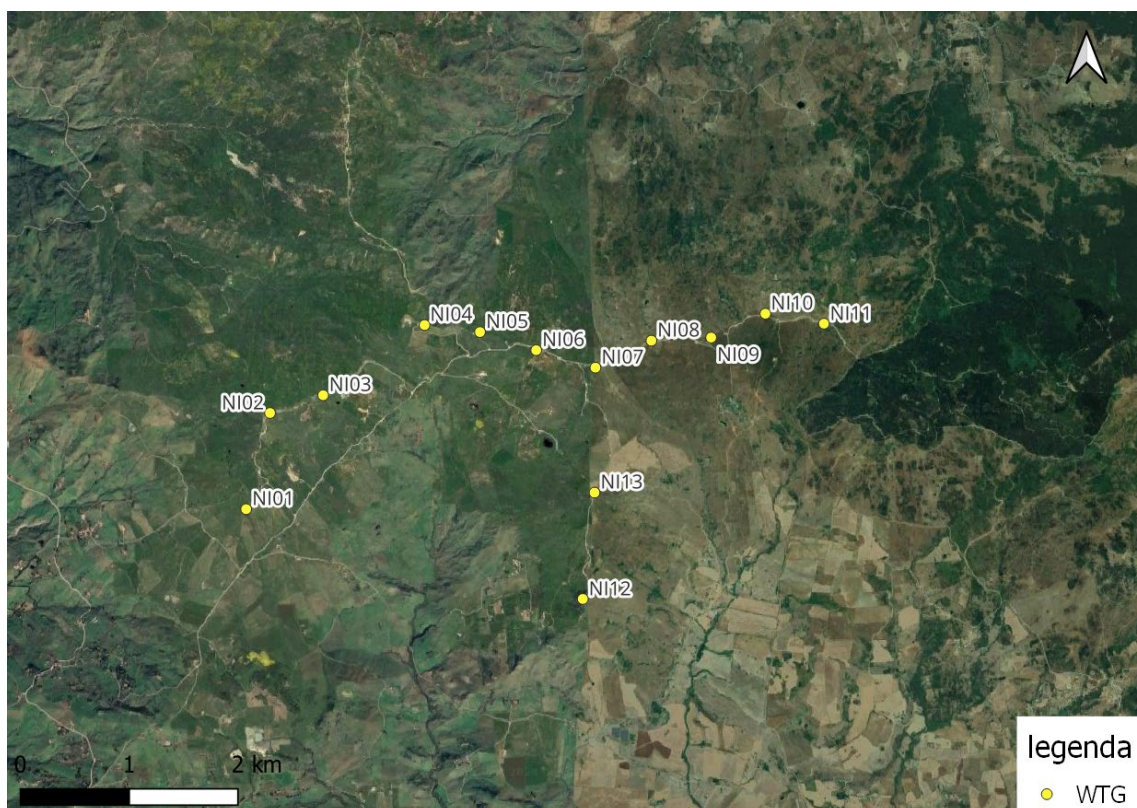


Figura 2-2: Configurazione proposta su ortofoto

Di seguito è riportato in formato tabellare un dettaglio sulla locazione delle WTG di nuova costruzione, in coordinate WGS84 UTM fuso 33N:

Tabella 1: Coordinate aerogeneratori

ID	Comune	Est	Nord	Altitudine [m s.l.m.]
<b>NI01</b>	Nicosia	435152,37	4186572,87	997
<b>NI02</b>	Nicosia	435371,96	4187457,03	1093
<b>NI03</b>	Nicosia	435860,43	4187620,53	1073
<b>NI04</b>	Nicosia	436793,02	4188265,95	1105
<b>NI05</b>	Nicosia	437302,81	4188201,13	1083
<b>NI06</b>	Nicosia	437819,67	4188034,76	1087
<b>NI07</b>	Nicosia	438364,31	4187874,32	1101
<b>NI08</b>	Nicosia	438879,01	4188122,02	1111
<b>NI09</b>	Nicosia	439428,41	4188150,68	1119
<b>NI10</b>	Nicosia	439927,01	4188370,05	1142
<b>NI11</b>	Nicosia	440465,48	4188278,58	1124
<b>NI12</b>	Nicosia	438248,00	4185747,00	1056
<b>NI13</b>	Nicosia	438356,00	4186725,00	1055

### 3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

Il sito di Nicosia è caratterizzato da un'ottima ventosità che ha garantito, negli anni di esercizio, un'elevata produzione di energia elettrica dell'impianto esistente.

La velocità del vento è misurata in sito tramite la stazione anemometrica integrata con sistema LIDAR "Castel di Lucio Nicosia MM2D - 397456", situata a nord delle WTG di nuova costruzione "NI06" e "NI07", ad un'altitudine pari a 1080 m s.l.m. come mostrato in figura:

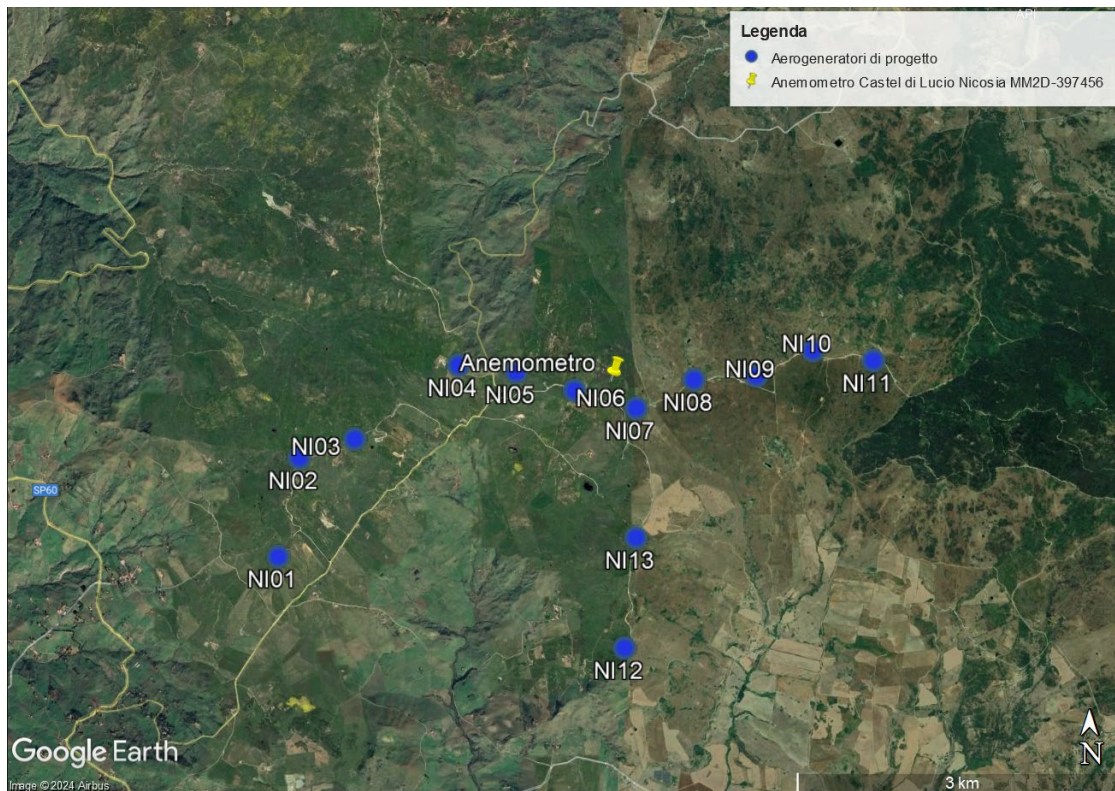


Figura 3-1: Inquadramento stazione anemometrica "Castel di Lucio Nicosia MM2D - 397456"

La stazione anemometrica, di coordinate 438131m E 4188114m N, è integrata con sistema LIDAR e attualmente impegnata in una campagna anemometrica. La stazione misura la direzione del vento e la sua velocità, necessaria per il calcolo della stima di producibilità. Essa misura, inoltre, la temperatura ambiente che determina la densità dell'aria, altra variabile nella stima di producibilità.

Di seguito vengono riportati i sensori dell'anemometro e le relative grandezze misurate:

Altezza Sensore	Orientamento	Grandezza misurata
100 m s.l.s.	TOP	Velocità
98 m s.l.s.	90°	Velocità
98 m s.l.s.	270°	Velocità
80 m s.l.s.	90°	Velocità
80 m s.l.s.	270°	Velocità
60 m s.l.s.	90°	Velocità
60 m s.l.s.	270°	Velocità
93 m s.l.s.	0°	Direzione
77 m s.l.s.	0°	Direzione
57 m s.l.s.	0°	Direzione
96 m s.l.s.	-	Pressione
98 m	-	Temperatura, umidità
10 m	-	Temperatura, umidità





**Figura 3-2: Orientamento supporti velocità**

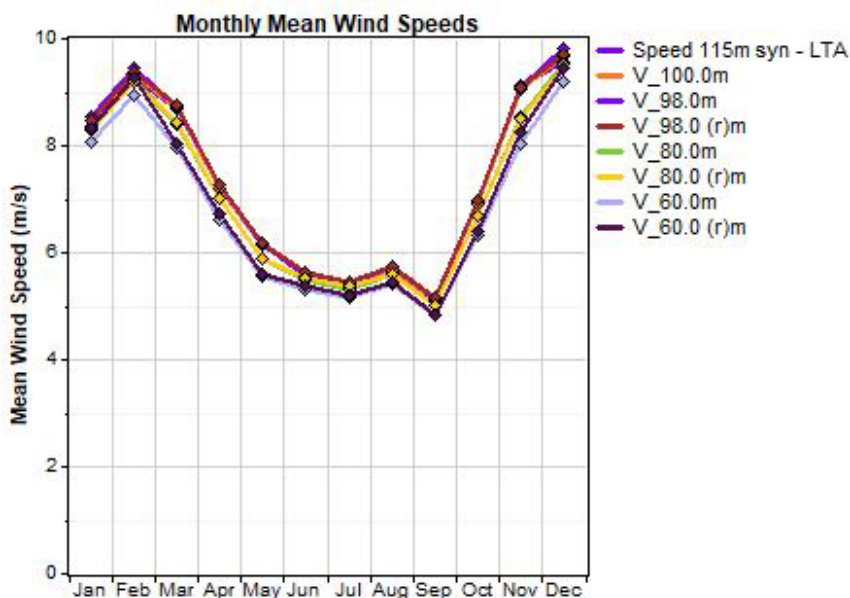




**Figura 3-3: Orientamento sensori di direzione**

Il periodo di raccolta dati utilizzato è pari ad un anno, 01/09/2021-01/09/2022. Si sottolinea comunque che la campagna anemometrica è ancora in corso.

La velocità media mensile e la direzione del vento misurate dalla stazione anemometrica sono riportate nelle figure sottostanti. In Figura 3-4 vengono rappresentate le velocità medie mensili rilevate da ogni sensore, con '(r)' che indica i sensori orientati a 270°. Il profilo di velocità e direzione a 115 m verranno dettagliati nel capitolo 5.



**Figura 3-4: Profilo medio mensile di velocità del vento alla stazione anemometrica**

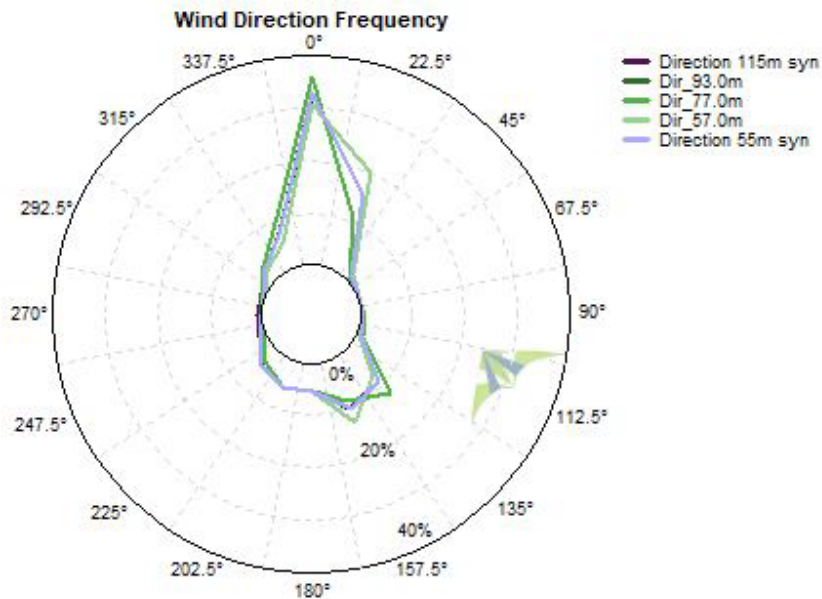


Figura 3-5: Direzione prevalente vento alla stazione anemometrica

Come visibile dalla *Figura 3-4: Profilo medio mensile di velocità del vento* e come spiegato precedentemente la velocità del vento è misurata a quattro altezze diverse della stazione anemometrica: a 60, 80, 98 e 100 metri da terra. La multipla misura 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 (115 m), come spiegato con maggiore dettaglio nel capitolo MODELLO DI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA 5.

Come visibile dalla *Figura 3-5* la direzione del vento è prevalente da nord. Questo fattore è molto importante per la progettazione di impianti eolici, al fine di individuare il posizionamento degli aerogeneratori ed evitare effetti di scia tra essi.

Si evidenziano anche nelle figure seguenti i profili diurni e il profilo verticale della velocità da cui si può valutare infatti quale sia la variazione della velocità del vento in funzione dell'altezza dal suolo:

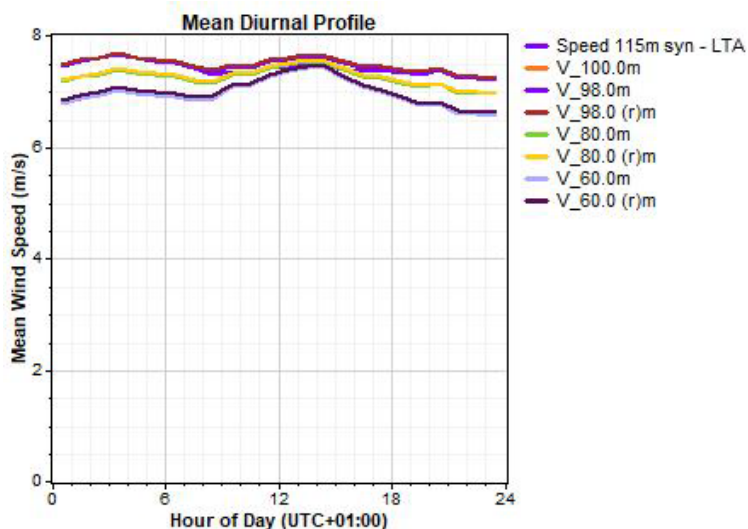


Figura 3-6: Profilo medio giornaliero di velocità del vento

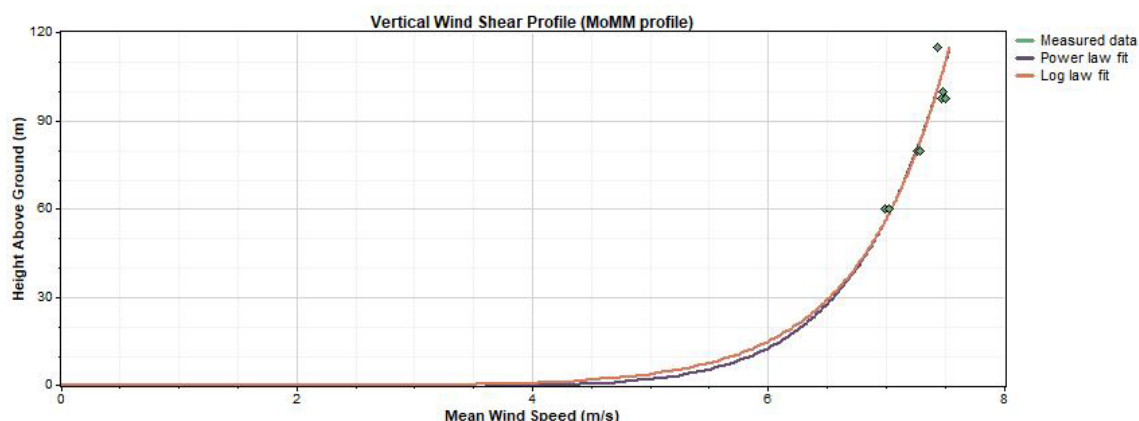


Figura 3-7: Profilo verticale del vento fino ad altezza mozzo pari a 115 m

Il sito è caratterizzato da ottimi valori di velocità del vento che garantiscono un'elevata producibilità del sito, come già registrato negli oltre dieci anni di funzionamento dell'impianto esistente.

#### 4. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO

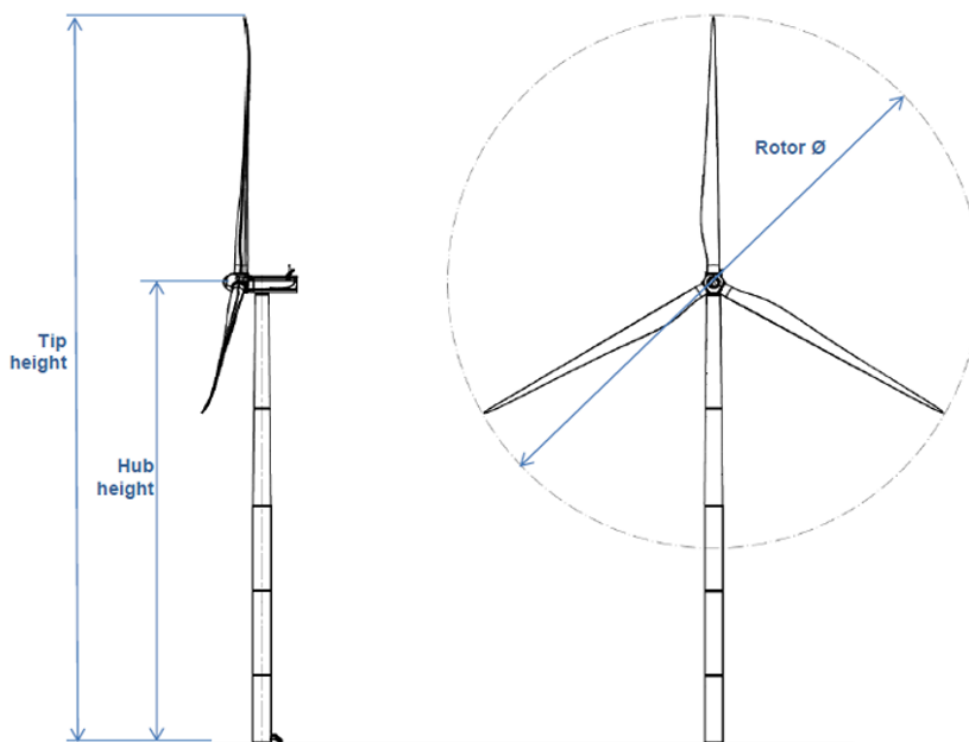
Gli aerogeneratori che verranno installati nel nuovo impianto di Nicosia saranno selezionati sulla base delle più innovative tecnologie disponibili sul mercato. La potenza nominale delle turbine previste sarà pari a massimo 6,0 MW. Il tipo e la taglia esatta dell'aerogeneratore saranno comunque individuati 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:

Tabella 2: Caratteristiche tecniche aerogeneratore

Potenza nominale	6,0 MW
Diametro del rotore	170 m
Lunghezza della pala	83 m
Corda massima della pala	4,5 m
Area spazzata	22.298 m <sup>2</sup>
Altezza al mozzo	115 m
Classe di vento IEC	IIIA
Velocità cut-in	3 m/s
V nominale	10 m/s
V cut-out	25 m/s

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



Diametro rotore (Rotor Ø)	170 m
Altezza mozzo (Hub height)	115 m
Altezza massima (Tip height)	200 m

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

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 33.000 V.

È riportata di seguito anche la curva di potenza dell'aerogeneratore in funzione della velocità del vento registrata al mozzo della WTG, valida per una densità dell'aria pari a 1,225 kg/m<sup>3</sup>:



SG 6.0-170 Power Curve

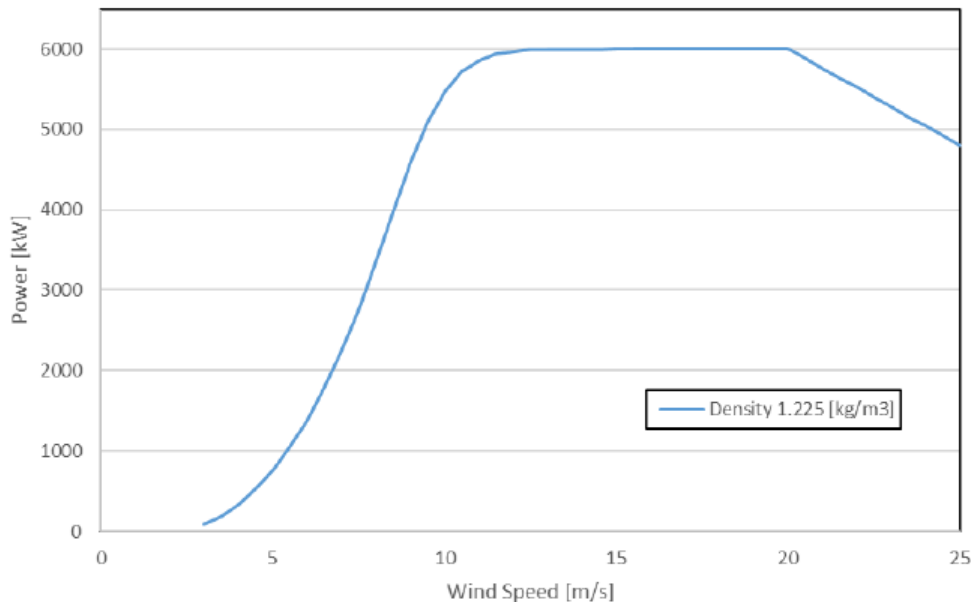


Figura 4-2: Curva di Potenza SG 6.0 - 170

Come visibile in figura, la velocità di cut-in è pari a 3 m/s mentre la velocità a cui corrisponde il funzionamento nominale della WTG ( $v_{rated}$ ) è pari a circa 10 m/s.

La curva di potenza è in caso opportunamente tarata in base alla densità media dell'aria registrata in sito, pari a 1,077 kg/m<sup>3</sup>.

## 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.

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);
- $\alpha$  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  $\alpha$ .

Le misure del vento alle quote di riferimento sono quelle riportate al capitolo 3, registrate presso la stazione anemometrica "Castel di Lucio Nicosia MM2D - 397456". Come già evidenziato, la stazione misura la velocità del vento a quattro quote differenti. Questo permette di poter identificare il coefficiente  $\alpha$  tra queste quote e applicarlo poi per l'identificazione della velocità del vento all'altezza del mozzo dell'aerogeneratore (Figura 3-7: *Profilo verticale del vento fino ad altezza mozzo pari a 115 m*)

Dall'analisi effettuata sono ottenuti i seguenti grafici di velocità e direzione del vento all'altezza del mozzo, 115 m:

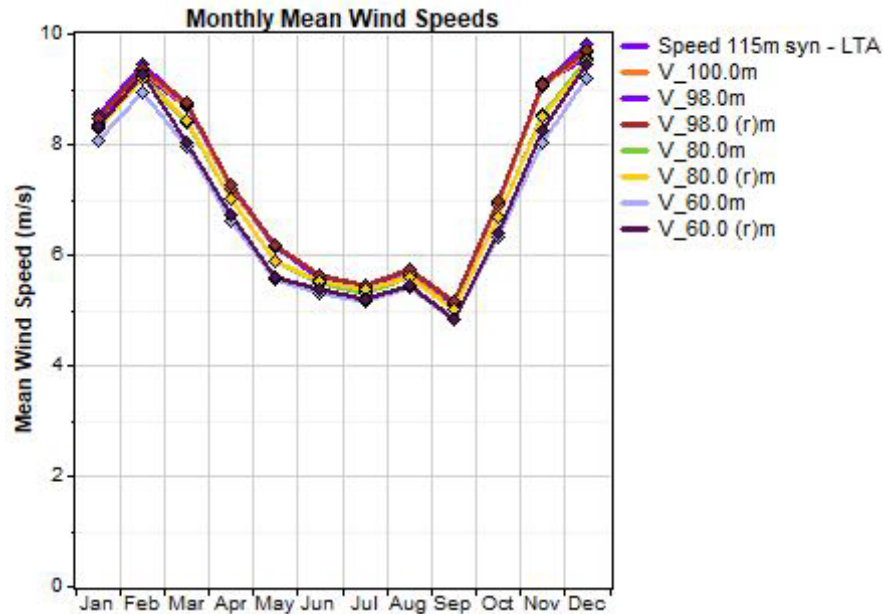


Figura 5-1: Profilo medio mensile di velocità del vento all'altezza del mozzo

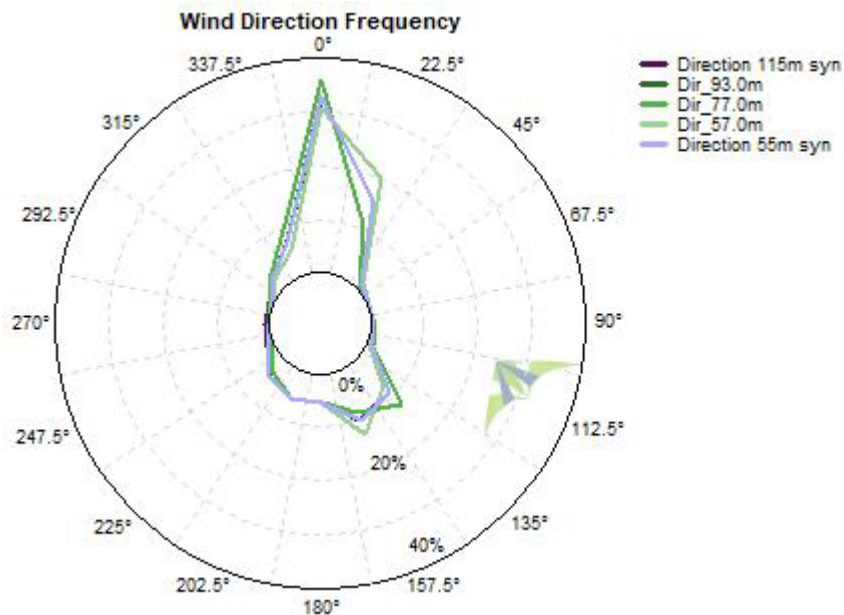


Figura 5-2: Direzione prevalente vento

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:

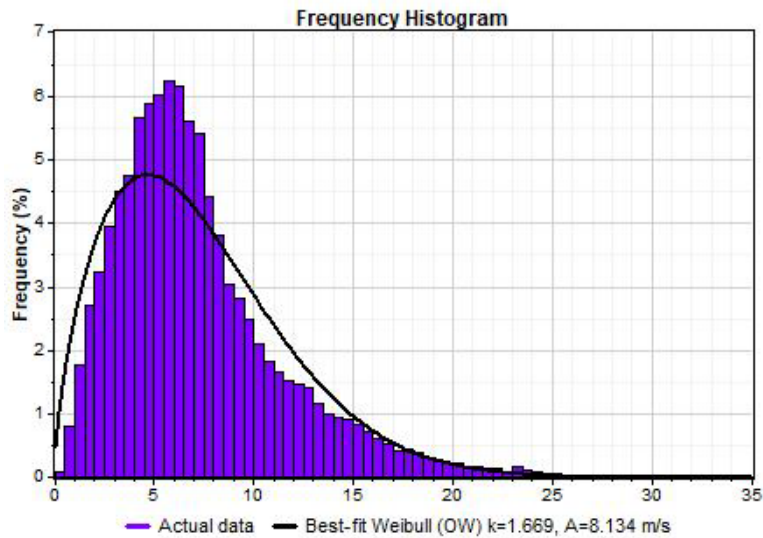


Figura 5-3: Distribuzione di Weibull

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 dalla WTG in quella condizione di vento, ricavata dalla curva di potenza, e 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:

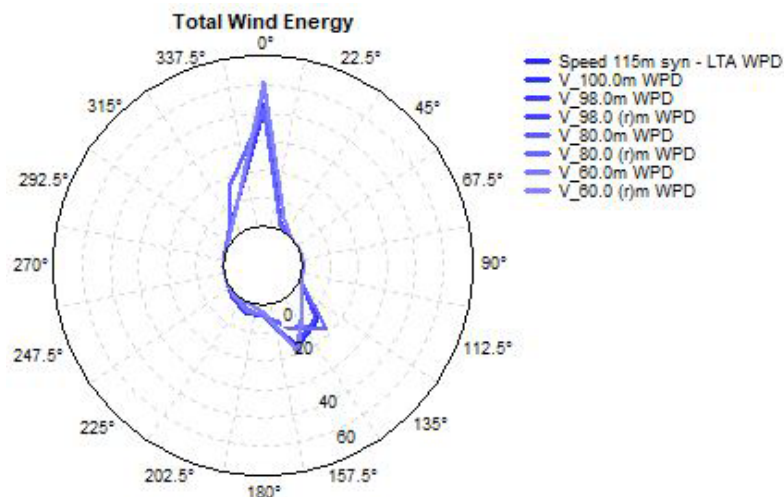


Figura 5-4: Energia dal vento

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 le turbine 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 e 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.

Infine per calcolare l'energia annua netta sono state considerate le perdite tecniche, quali disponibilità aerogeneratori, perdite elettriche, perdite di performance aerogeneratori e perdite di ambiente.

## 6. RISULTATI

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

**Tabella 3: Risultati stima di producibilità**

Caratteristica	Valore
Potenza Installata	78 MW
Modello WTG	Siemens Gamesa SG170 6.0 (IIIa)
Potenza nominale WTG	6 MW
N° di WTG	13
Classe IEC	IIIa
Diametro del rotore	170 m
Altezza del mozzo	115 m
Velocità del vento all'altezza di mozzo (free)	7,19 m/s
Energia lorda annua P50	251.857 MWh
Perdite di scia complessive	3,08 %
Perdite tecniche complessive	18,78 %
<b>Energia prodotta annua P50</b>	<b>198.262 MWh</b>
<b>Ore equivalenti P50</b>	<b>2542</b>

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 198,3 GWh all'anno, per un totale di 2542 ore equivalenti. Come già evidenziato, il sito è caratterizzato da ottimi valori di ventosità che garantiscono un'elevata producibilità