



Green Power

Engineering & Construction



GRE CODE

GRE.EEC.R.73.IT.W.14180.00.014.01

PAGE

1 di/of 13

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

INTEGRALE RICOSTRUZIONE DELL'IMPIANTO EOLICO DI MONTEMAGGIORE BELSITO

PROGETTO DEFINITIVO

Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità



File: GRE.EEC.R.73.IT.W.14180.00.014.01 - Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità

| REV. | DATE | DESCRIPTION | PREPARED | VERIFIED | APPROVED |
|------|------------|------------------------------|-------------|-----------|------------|
| 01 | 15/07/2020 | <i>Integrazione commenti</i> | N. Novati | M. Terzi | L. Lavazza |
| 00 | 10/07/2020 | <i>Prima emissione</i> | D. Gradogna | N. Novati | L. Lavazza |

GRE VALIDATION

| | | |
|--------------------|--------------------|------------------------|
| <i>Lenci (GRE)</i> | <i>Magri (GRE)</i> | <i>Iaciofano (GRE)</i> |
| COLLABORATORS | VERIFIED BY | VALIDATED BY |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|------------|----------|----------|-------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| PROJECT / PLANT Montemaggiore Belsito | GRE CODE | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | GROUP | FUNCTION | TYPE | ISSUER | COUNTRY | TEC | PLANT | | | | SYSTEM | PROGRESSIVE | REVISION | | | | | | |
| | GRE | EEC | R | 7 | 3 | I | T | W | 1 | 4 | 1 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 0 |
| CLASSIFICATION | PUBLIC | | | | UTILIZATION SCOPE | BASIC DESIGN | | | | | | | | | | | | | |

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.14180.00.014.01

PAGE

2 di/of 13

INDEX

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUZIONE | 3 |
| 1.1. DESCRIZIONE DEL PROPONENTE | 3 |
| 1.2. CONTENUTI DELLA RELAZIONE | 3 |
| 2. INQUADRAMENTO DEL SITO | 3 |
| 3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA | 5 |
| 4. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO | 7 |
| 5. MODELLO DI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA | 9 |
| 6. RISULTATI | 13 |

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 Montemaggiore Belsito e Sclafani Bagni (PA) in località "Cozzo Vallefondi", costituito da 18 aerogeneratori di potenza nominale pari a 0,85 MW, per una potenza totale installata di 15,3 MW.

L'energia prodotta dagli aerogeneratori, attraverso il sistema di cavidotti interrati in media tensione, viene convogliata a due cabine MT separate, una ubicata nell'area dell'impianto di Montemaggiore Belsito, l'altra all'interno dell'area di impianto di Sclafani Bagni.

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 18 a 6, per una nuova potenza installata prevista pari a 36 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 CO₂ 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 DEL SITO

Il sito, oggetto del presente elaborato, è ubicato a circa 50 km a Sud-Est di Palermo ed a qualche km ad Est delle Madonie, nei comprensori comunali di Montemaggiore Belsito (PA) e Sclafani Bagni (PA), Regione Sicilia.

L'area interessata si sviluppa lungo i crinali di un'area collinare. I crinali hanno sviluppo ad arco in direzione Est-Ovest.

L'impianto in progetto ricade interamente entro i confini comunali di Montemaggiore Belsito e Sclafani Bagni, in particolare all'interno dei seguenti riferimenti cartografici:

- Foglio di mappa catastale del Comune di Montemaggiore Belsito n° 21;
- Foglio di mappa catastale del Comune di Sclafani Bagni n° 13-14;
- Fogli I.G.M. in scala 1:25.000, codificati 259-II-NO Alia;
- Carta tecnica regionale CTR in scala 1:10.000, foglio n° 609140.

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:

| ID | Comune | Est | Nord | Altitudine [m s.l.m.] |
|--------------|-----------------------|-----------|------------|-----------------------|
| MB-01 | Montemaggiore Belsito | 392155,10 | 4185035,00 | 953 |

| | | | | |
|--------------|-----------------------|-----------|------------|------|
| MB-02 | Montemaggiore Belsito | 392626,00 | 4185291,00 | 999 |
| MB-03 | Montemaggiore Belsito | 393155,00 | 4185406,00 | 947 |
| MB-04 | Montemaggiore Belsito | 393729,00 | 4185401,00 | 965 |
| MB-05 | Sclafani Bagni | 394324,00 | 4185869,00 | 1012 |
| MB-06 | Sclafani Bagni | 394954,00 | 4185932,00 | 1007 |

3. CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

Il sito di Montemaggiore Belsito 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 "Caltavuturo 2", situata a 10 km a sud-est dell'area di impianto, ad un'altitudine pari a 1031 m s.l.m. come mostrato in figura:

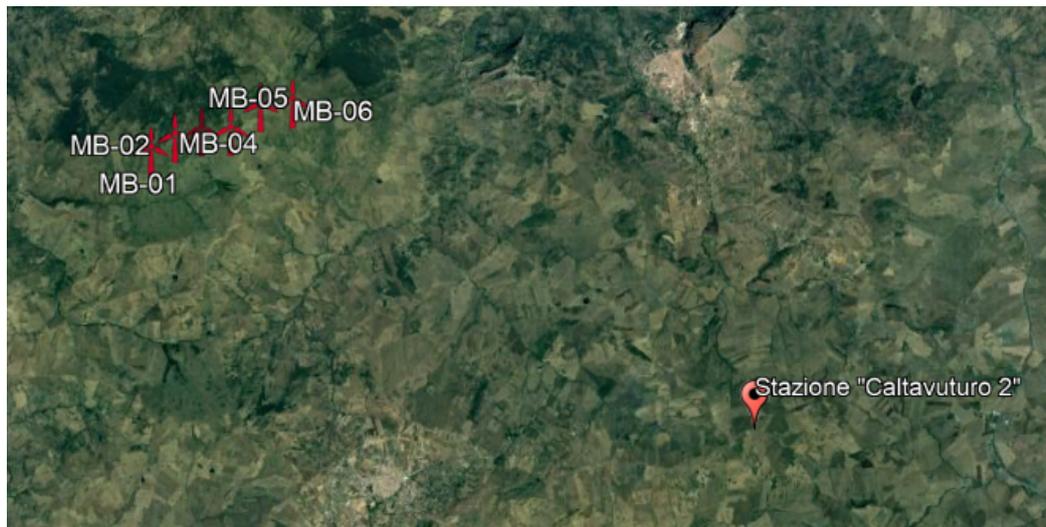


Figura 3-1: Inquadramento stazione anemometrica "Caltavuturo 2"

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:

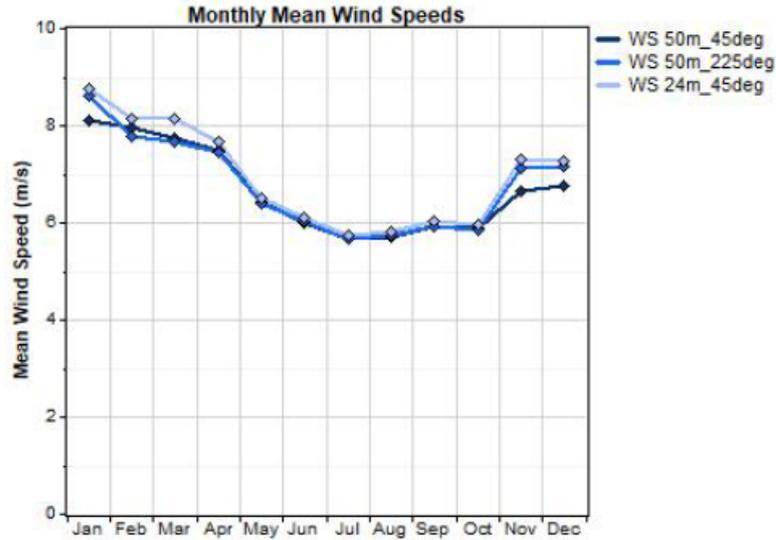


Figura 3-2: Profilo medio mensile di velocità del vento alla stazione anemometrica

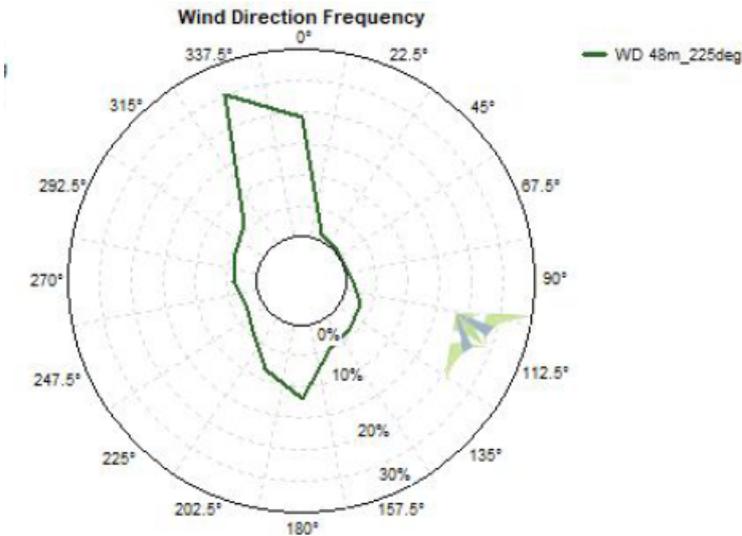


Figura 3-3: Direzione prevalente vento alla stazione anemometrica

Come visibile dalla Figura 3-2: Profilo medio mensile di velocità del vento la velocità del vento è misurata a due altezze diverse della stazione anemometrica: a 24 metri e a 50 metri da terra. La doppia 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, come spiegato con maggiore dettaglio nel capitolo MODELLO DI VALUTAZIONE RISORSA EOLICA 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 evidenzia anche in figura seguente il profilo diurno medio della velocità del vento:

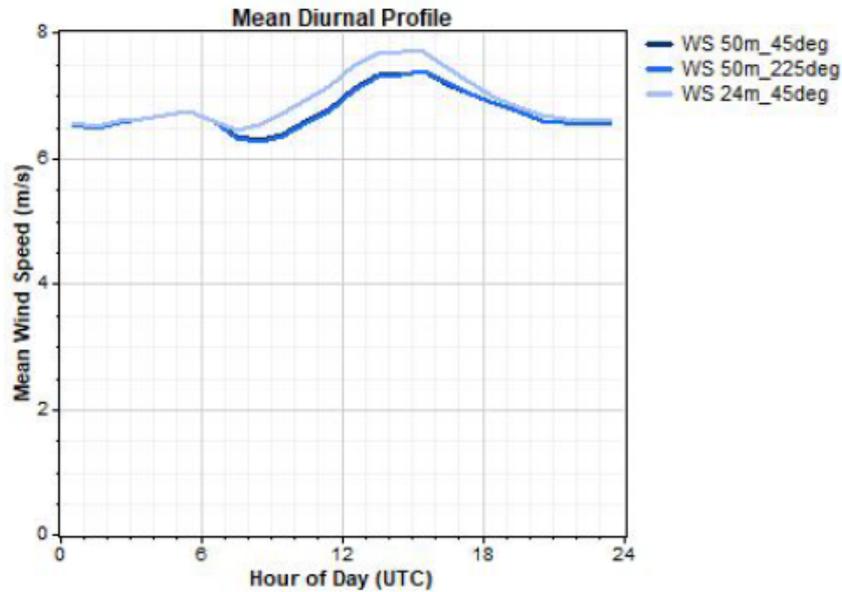


Figura 3-4: Profilo medio giornaliero di velocità del vento alla stazione anemometrica

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.

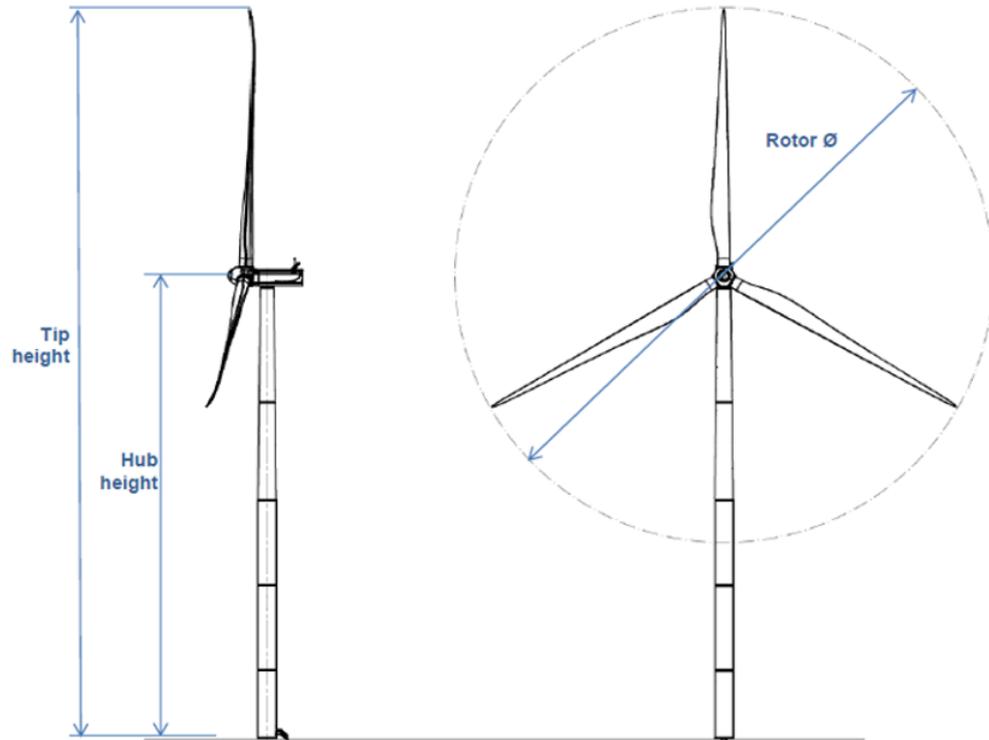
4. AEROGENERATORE DI RIFERIMENTO

Gli aerogeneratori che verranno installati nel nuovo impianto di Montemaggiore Belsito 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 m |
| Corda massima della pala | 4,5 m |
| Area spazzata | 22.298 m ² |
| 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/m³:

SG 6.0-170 Power Curve

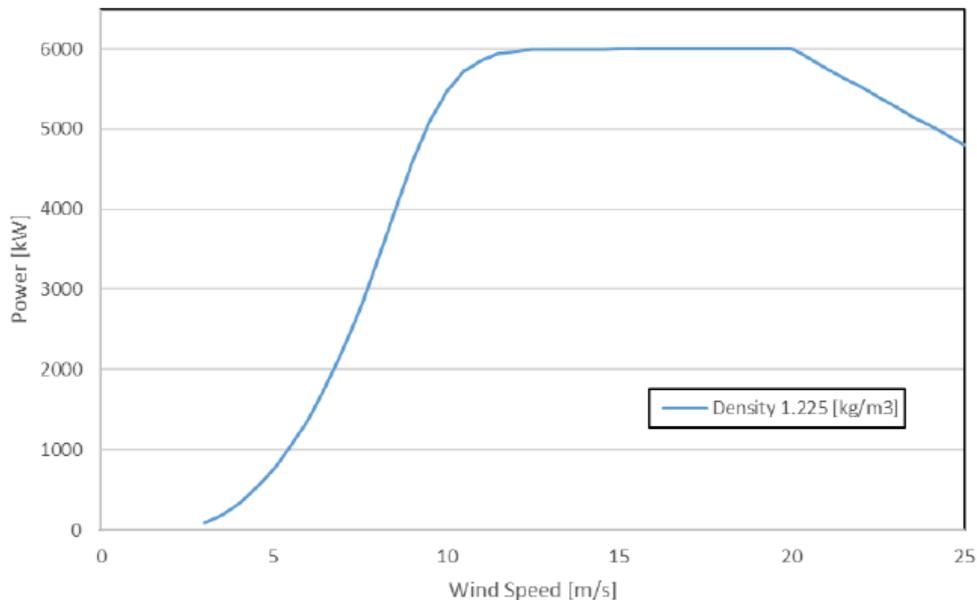


Figura 4-2: Curva di Potenza SG 6.0 - 170

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/m³.

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);
- 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 "Caltavuturo 2". Come già evidenziato, la stazione misura la velocità del vento a due quote differenti: 24 e 50 metri. Questo permette di poter identificare il coefficiente α tra queste due quote e applicarlo poi per l'identificazione della velocità del vento all'altezza del mozzo dell'aerogeneratore.

Dall'analisi effettuata per diverse altezze sono ottenuti i seguenti grafici di velocità e direzione del vento all'altezza del mozzo:

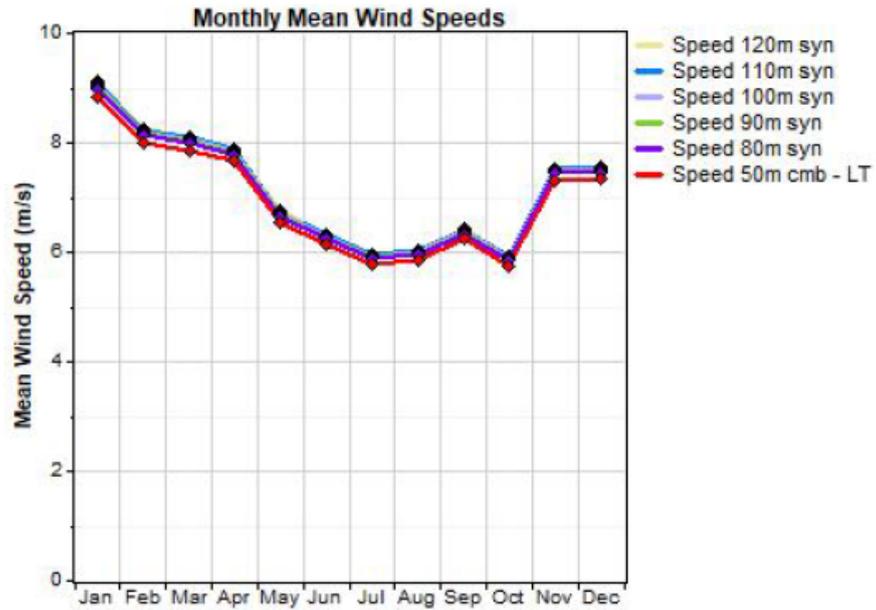


Figura 5-1: Profilo medio mensile di velocità del vento all'altezza del mozzo

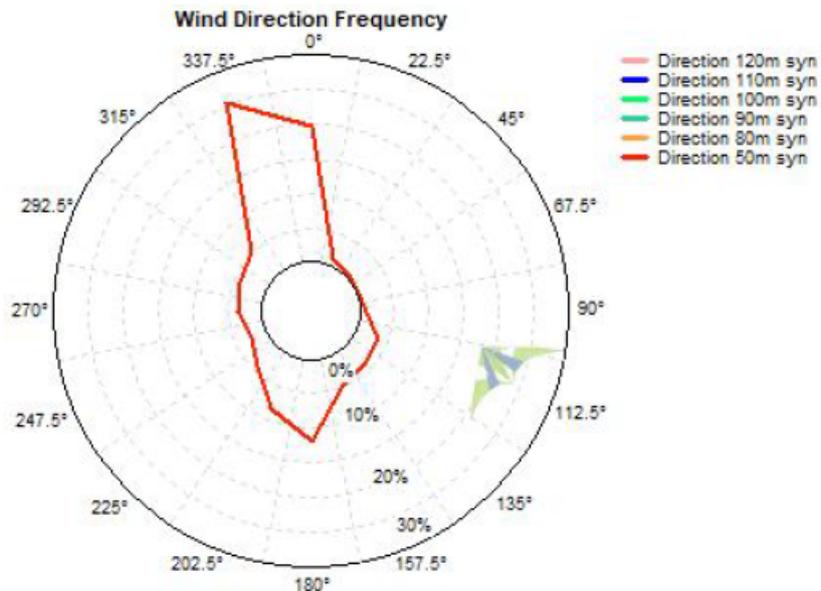


Figura 5-2: Direzione prevalente vento

È riportato di seguito anche il grafico del profilo medio diurno di velocità del vento:

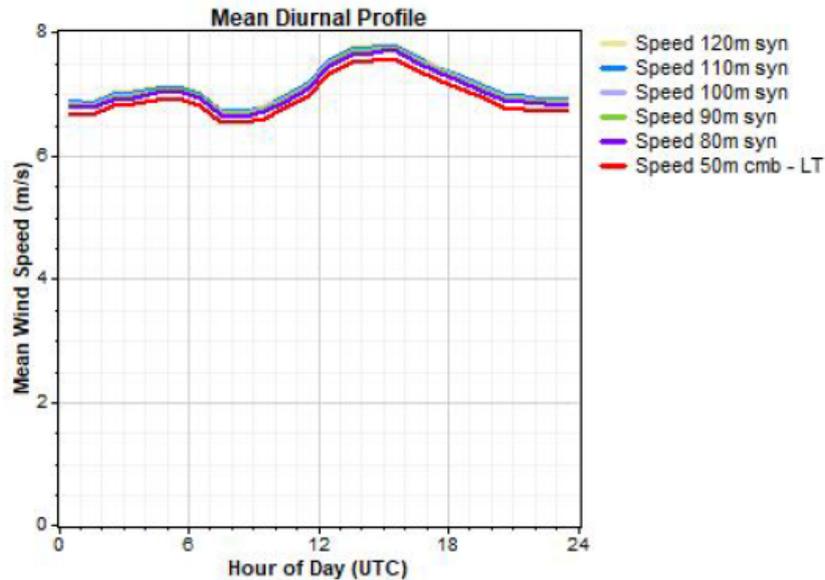


Figura 5-3: Profilo medio giornaliero di velocità del vento all'altezza del mozzo

Come visibile dalle figure riportate sopra, la velocità del vento varia sostanzialmente alle basse altitudini, mentre le curve pressoché coincidono una volta superata una certa altitudine. È quindi ragionevole applicare la curva di velocità a 120 metri agli aerogeneratori di riferimento che hanno il mozzo ad un'altezza pari a 115 metri.

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:

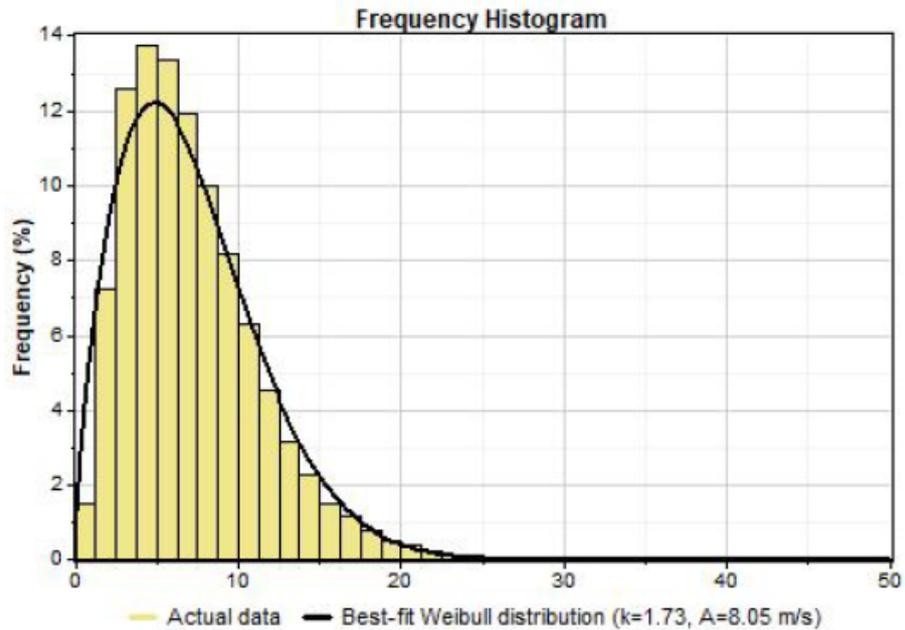


Figura 5-4: Distribuzione di Weibull

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:

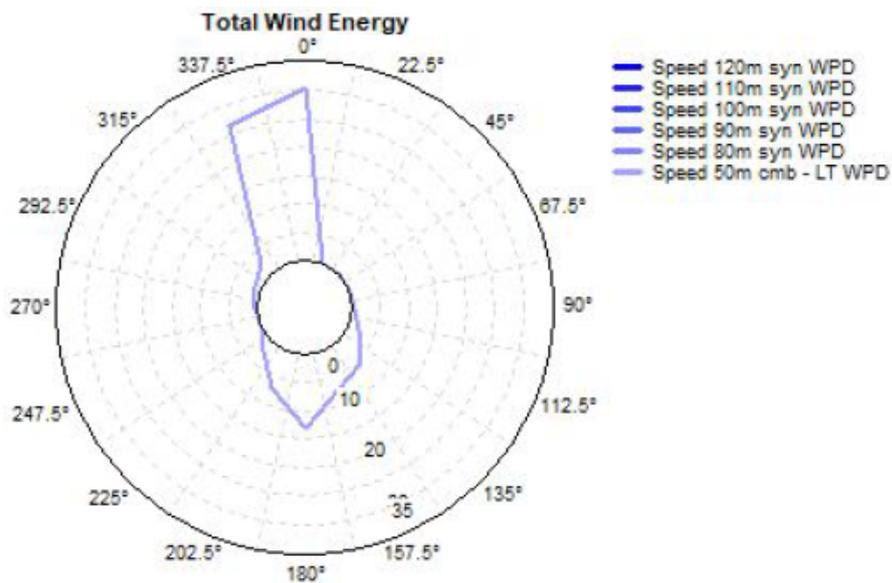


Figura 5-5: Energia dal vento

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.

6. **RISULTATI**

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

| Caratteristica | Valore |
|--|---------------------------------|
| Potenza Installata | 36 MW |
| Modello WTG | Siemens Gamesa SG170 6.0 (IIIa) |
| Potenza nominale WTG | 6 MW |
| N° di WTG | 6 |
| Classe IEC | IIIa |
| Diametro del rotore | 170 m |
| Altezza del mozzo | 115 m |
| Velocità del vento all'altezza di mozzo (free) | 6,88 m/s |
| Energia prodotta annua P50 | 96.049 MWh |
| Ore equivalenti P50 | 2668 |

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 96,0 GWh all'anno, per un totale di 2668 ore equivalenti. Come già evidenziato, il sito è caratterizzato da ottimi valori di ventosità che garantiscono un'elevata producibilità