



REGIONE PUGLIA



PROVINCIA di FOGGIA



COMUNE di FOGGIA



Progetto Uno

Progetto Uno s.r.l. via Napoli, 116 - cap. 95127 Catania (CT)
amm.: Oliver Lutz - cod. fisc. 0585151074 Tel.:3386386396

PROGETTO DEFINITIVO

Progetto per la realizzazione di un impianto eolico denominato "Wind 1" della potenza nominale di 54,4 MW nel Comune di Foggia loc. Cantone

Decreto Legislativo 29 dicembre 2003 n° 387- Attuazione della direttiva 2001/77/CE
Promozione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità'

ELABORATO

Relazione anemologica e producibilità

| FORMATO | SCALA | CODICE DOCUMENTO | | | | | NOME FILE |
|---------|-------|------------------|-------|-----------|-------|------|------------------|
| A4 | / | SOC. | DISC. | TIPO DOC. | PROG. | REV. | PRO-ANEM-REL-001 |
| | | PRO | SPEC | REL | 001 | A | |

Coordinamento
e Progettazione



Studio Tecnico Associato
ing. Giovanni Bruno - arch. G.Farinola
Viale Europa, 62/a Foggia (FG)
Tel. 0881373998 - 3356013949
E-mail: ingbruno@tiscali.it

Studio Archeologico



Dott. Antonio Mesisca
Via Aldo Moro B/5 82021 Apice (BN)
Tel. 3271616306
E-mail: mesisca.antonio@virgilio.it

Studio Geologico e
consulenza ambientale

Geol. Francesco Ferrante
Studio di Geologia Tecnica e Ambientale
Via Attilio Benvenuto, 76 - Foggia (FG)
Tel. 0881742216 - 3385654577
E-mail: ferrantegeo@gmail.com

Studio Agronomico

Dott. Antonio Totaro
Viale L. Da Vinci, 1 Manfredonia (FG)
Tel. 3486403829
E-mail: atotaro033@gmail.com

Studio Paesaggistico

Arch. Giuseppe Farinola
Viale Europa, 62/a Foggia (FG)
Tel. 0881373998 - 3387535391
E-mail: agfarinola@virgilio.it

Studio Elettrico



Sciacca & Partners S.r.l.
C.so Vittorio Emanuele III, 51
96015 Francofonte (SR)
CF e P.IVA: 01871700892
E-mail: noi@sciaccapartners.it

Rilievo Topografico



Studio Tecnico
Dott. Agr. Rocco Iacullo
Via Padre Antonio da Olivadi, 89 - Foggia
Tel. 0881665592 - 3930051965
E-mail: studioiacullo@gmail.com

Studio Acustico

Ing. Michele Russo
Via Mascagni, 1 - Margherita di Savoia (BT)
Tel. 3495343724
E-mail: russomicheleing@gmail.com

| Rev. | Data | Oggetto della revisione | Elaborazione | Verifica | Approvazione |
|------|------|-------------------------|--------------|----------|--------------|
| | | | | | |
| | | | | | |

| | |
|--|----|
| Premessa..... | 3 |
| Analisi del sito e Layout..... | 3 |
| Quadro CTR..... | 3 |
| Modello digitale orografico | 3 |
| Aerogeneratore..... | 4 |
| Model VESTAS V172 PO6800 | 6 |
| Model VESTAS V172 PO6800 – SO4 (solo Aerogeneratore n. 4)..... | 6 |
| Coordinate di layout..... | 7 |
| Metodo di calcolo..... | 7 |
| Dati anemometrici di input..... | 7 |
| Verifiche sul modello | 8 |
| Verifica dell'approssimazione della curva di Weibull | 9 |
| Verifica del gradiente al suolo della velocità del vento | 9 |
| Mappa di rugosità..... | 10 |
| Densità dell'aria..... | 10 |
| Classificazione di sito | 10 |
| Turbolenza | 10 |
| I fattori di perdita | 11 |
| Analisi dell'incertezza | 11 |

Premessa

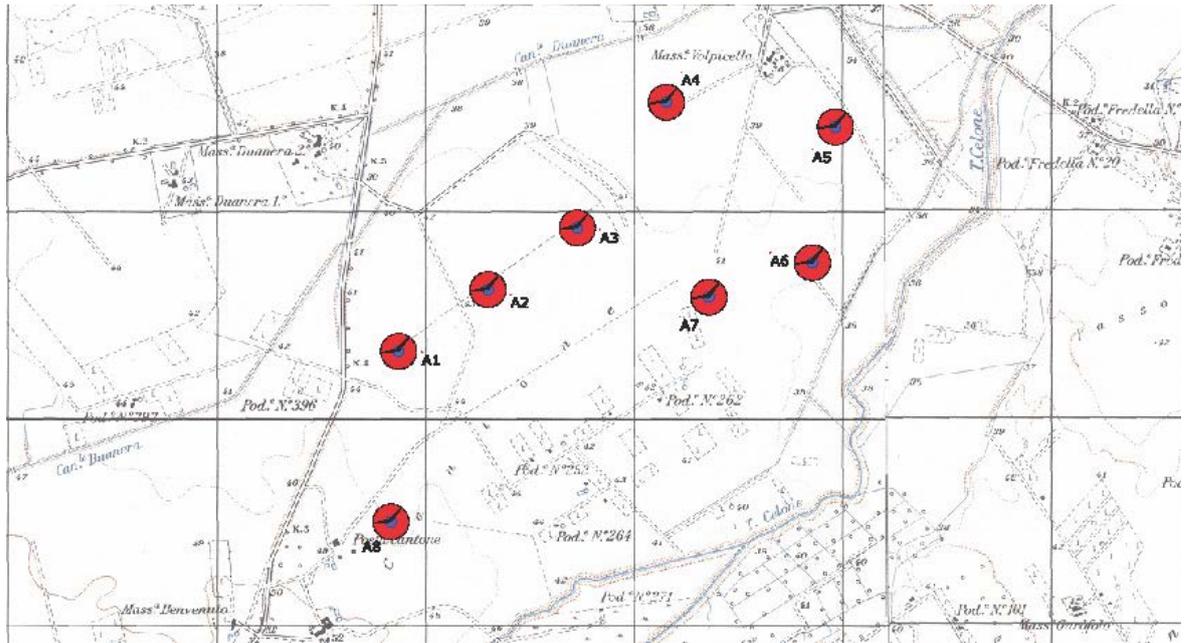
Con la presente relazione anemologica, si analizzano le principali condizioni anemologiche presenti nel sito di progetto relativo all'installazione di un parco eolico della potenza nominale massima di 54.4 MW, per mezzo di n. 8 aerogeneratori VESTAS V172, della potenza nominale massima pari a 6.8 MW ciascuno.

Dalla definizione delle condizioni anemologiche, lo studio simulato e le analisi specialistiche, si determinerà la stima del rendimento energetico dell'impianto su base annua. Il materiale fornito ai fini della presente valutazione di produzione attesa si compone dei seguenti elementi:

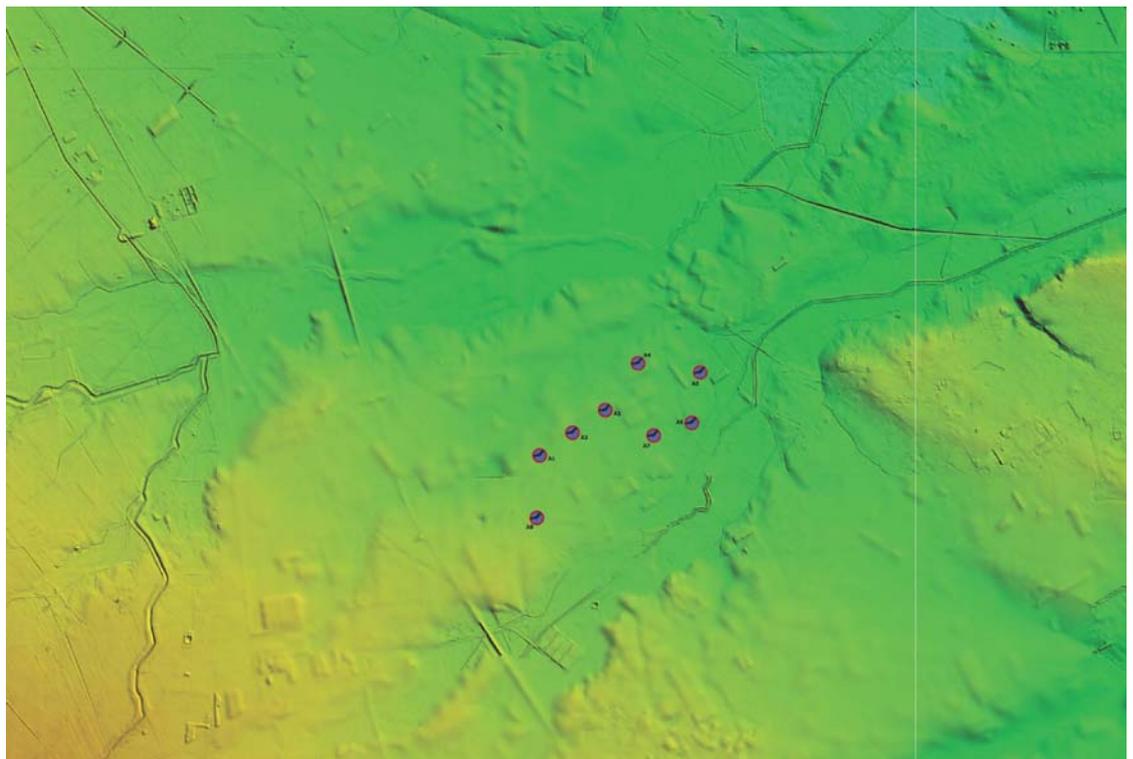
- dati di vento, in formato binario, raccolti in sito con stazione anemometrica;
- il layout di un impianto costituito da n° 8 per aerogeneratori V172;

Analisi del sito e Layout

Quadro CTR



Modello digitale orografico



Il modello digitale del terreno DTM (Digital Terrain Model) è stato elaborato dal grid disponibile in download del relative DTM regionale, georeferenziato, sovrapposto, confrontato e adeguato con le curve di livello presenti sulla cartografia ufficiale IGM 1:25000 con uno step di 3 m.

Aerogeneratore

Il modello di aerogeneratore prescelto allo stato attuale per tutti i calcoli di riferimento specialistico è stato il 6.8 MW prodotto dalla VESTAS Mod. V172, con $D=172$ mt ed $H_{\text{mozzo}}=114$ mt.

Modello base:

| | |
|---------------------|-------------|
| Modello | VESTAS V172 |
| Potenza | 6.8 MW |
| D_{rotore} | 172 mt |
| H_{mozzo} | 114 mt |

H_{Tot} 200 mt



Di seguito si riportano I dati tecnici base per l'aerogeneratore utilizzato.

| Wind Climate | DIBt S, IEC S |
|--|---------------|
| | PO6800 |
| Cut-In, V_{in} | 3 m/s |
| Cut-Out (10 min exponential avg.), V_{out} | 25 m/s |
| Re-Cut In (10 min exponential avg.) | 23 m/s |

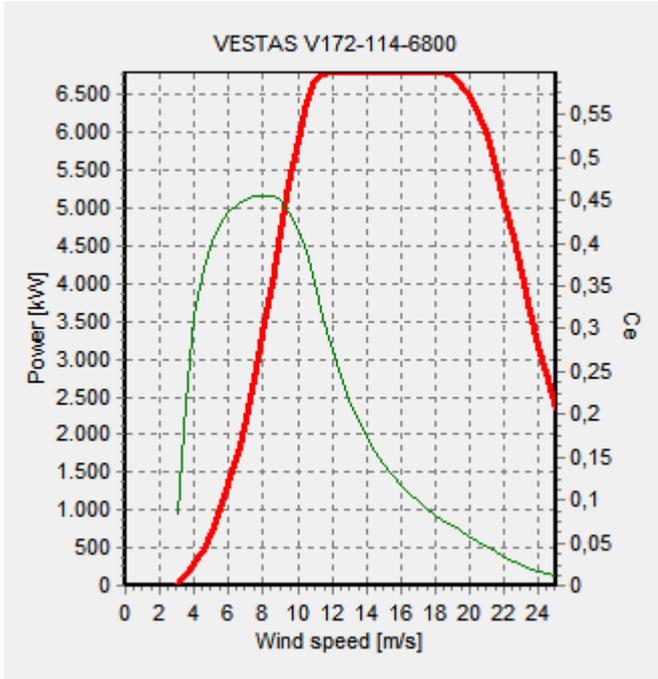
3.1 Climate and Site Conditions

The standard turbine is designed for the wind climate conditions listed below. Values refer to hub height.

| | DIBt towers | | IEC towers | | | |
|---|-------------|-----------|------------|----------|----------|----------|
| Wind Class | DIBt S | DIBt S | IEC S | IEC S | IEC S | IEC S |
| Hub Height | CHT* 175m | CHT* 164m | 166m | 150m | 117m | 114m |
| Power Rating | 6.8 MW | 6.8 MW | 6.8 MW | 6.8 MW | 6.8 MW | 6.8 MW |
| Average design parameters | | | | | | |
| Wind Speed (10 min average), V_{ave} | 7.2 m/s | 7.2 m/s | 7.4 m/s | 8.0 m/s | 7.4 m/s | 7.2 m/s |
| Weibull Scale Factor, C | 8.1 m/s | 8.1 m/s | 8.3 m/s | 9.0 m/s | 8.3 m/s | 8.1 m/s |
| Weibull Shape Factor, k | 2.00 | 2.00 | 2.48 | 2.50 | 2.50 | 2.10 |
| I_{ref} acc. to IEC 61400-1 | S | S | 15% | 13% | 14% | 11% |
| Turbulence Intensity, I_{90} (90% quant.) | S | S | 16.90% | 14.60% | 15.73% | 12.69% |
| Wind Shear, α | 0.27 | 0.27 | 0.30 | 0.21 | 0.22 | 0.15 |
| Inflow Angle | 8° | 8° | 8° | 8° | 8° | 8° |
| Extreme design parameters | | | | | | |
| Extr Wind Speed (10 min average), V_{50} | 38.0 m/s | 39.5 m/s | 35.0 m/s | 41.0 m/s | 39.5 m/s | 40.0 m/s |
| Survival Wind Speed (3 s gust), V_{e50} | 53.2 m/s | 55.3 m/s | 49.0 m/s | 57.4 m/s | 55.3 m/s | 56.0 m/s |
| Turbulence intensity, $I_{V(z)}$ | 11.10% | 11.10% | 11.00% | 11.00% | 11.00% | 11.00% |

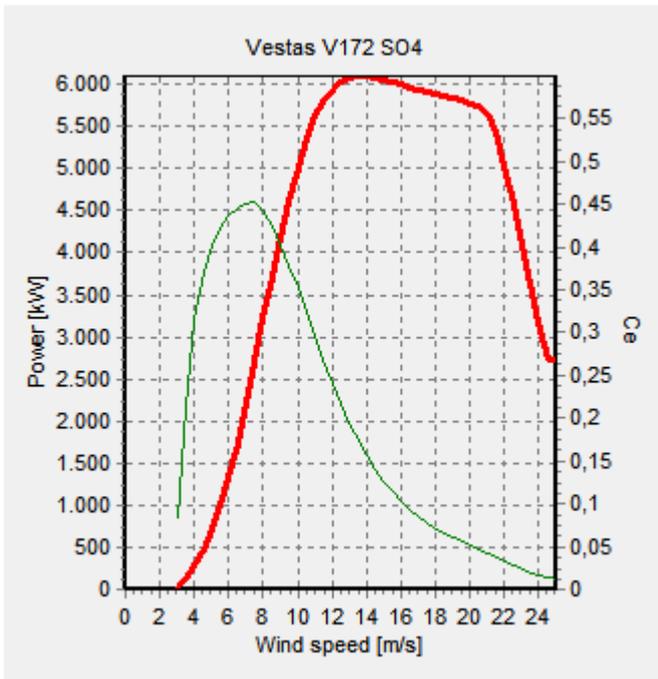
| Sound modes | | | |
|-------------|---------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Mode No. | Maximum Sound Level | Serrated trailing edges | Available hub heights |
| PO6800 | 106.0 dBA | Yes (standard) | 175 / 166 / 164 / 150 / 117 / 114 m |
| SO4 | 102 dBA | Yes (standard) | 175 / 166 / 164 / 150 / 117 / 114 m |

Model VESTAS V172 PO6800



Annual energy at 8 m/sec = 28.583 MWh

Model VESTAS V172 PO6800 – SO4 (solo Aerogeneratore n. 4)



Annual energy at 8 m/sec = 25.678 MWh

Coordinate di layout

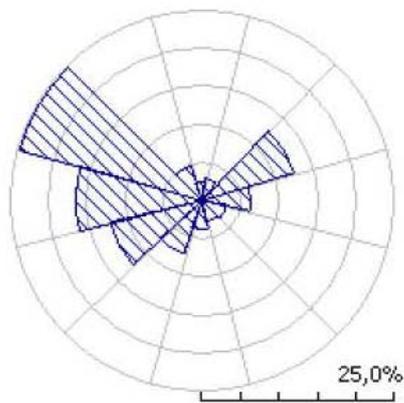
| Aerogeneratori | Foglio | Particella | Coordinate – EPSG32633 UTM 33 WGS84 | | Coordinate geografiche - EPSG4326 | |
|----------------------------------|-----------|---------------|--|---------|-----------------------------------|--------------|
| | | | | | Lat | Long |
| A1 | 26 | 181 | 545815 | 4600130 | 41,551523207 | 15,549361999 |
| A2 | 26 | 152 | 546243 | 4600428 | 41,554182646 | 15,554516802 |
| A3 | 26 | 153 | 546671 | 4600726 | 41,556841849 | 15,559672027 |
| A4 (<i>version SO4</i>) | 3 | 258 | 547098 | 4601332 | 41,562275008 | 15,564839839 |
| A5 | 10 | 14 | 547908 | 4601213 | 41,561155058 | 15,574544098 |
| A6 | 10 | 455/33 | 547798 | 4600558 | 41,555262116 | 15,573172840 |
| A7 | 10 | 21/280 | 547302 | 4600392 | 41,553796459 | 15,567212234 |
| A8 | 26 | 171 | 545778 | 4599308 | 41,544121600 | 15,548855734 |

Metodo di calcolo

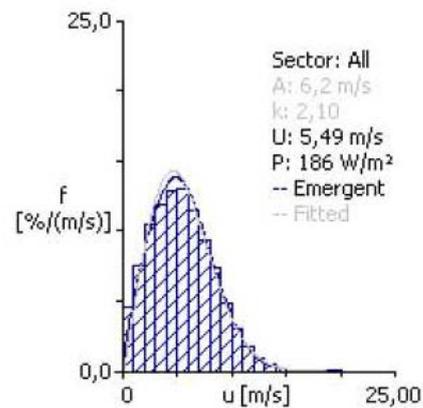
La valutazione di produzione attesa è stata realizzata con il codice di calcolo WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), messo a punto dal Risoe National Laboratory di Danimarca e basato su un modello matematico del flusso del vento. Il programma utilizza i dati anemologici per calcolare il vento geostrofico (vento indisturbato in quota) per una superficie di diversi km di raggio. Sovrapponendo tale vento al modello tridimensionale del terreno, il programma valuta l'andamento della velocità del vento e più in generale i parametri statistici della distribuzione della velocità in punti arbitrari di tale superficie, tenendo conto della sua natura orografica, della rugosità del terreno e dell'eventuale presenza di ostacoli al flusso del vento. Il campo di velocità fornito dal modello è tridimensionale e ciò consente di disporre in modo naturale anche del profilo della velocità media del vento a varie altezze dal suolo.

Dati anemometrici di input

Di seguito si riportano brevemente i dati di input per le valutazioni di calcolo eseguite:



4196 – Rosa dei venti



4196- Distribuzione velocità vento

'W4196' Observed Wind Climate

Site description: 'MACCHIA ROTONDA (FG) : Oct.2007 - Oct.2009 , (Code : 4196)'; Position: 41,45°N 15,74°E; Anemometer height: 50,00 m a.g.l.

| - | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A | 5,1 | 4,3 | 5,9 | 4,7 | 3,7 | 3,9 | 4,3 | 5,5 | 6,2 | 6,0 | 8,0 | 6,8 |
| k | 1,64 | 1,62 | 2,97 | 2,17 | 1,45 | 1,37 | 1,62 | 1,82 | 1,83 | 2,47 | 3,13 | 2,10 |
| U | 4,57 | 3,83 | 5,26 | 4,13 | 3,34 | 3,59 | 3,82 | 4,90 | 5,52 | 5,33 | 7,20 | 6,03 |
| P | 140 | 84 | 126 | 76 | 65 | 88 | 83 | 152 | 217 | 148 | 313 | 244 |
| f | 2,4 | 3,0 | 12,5 | 6,3 | 3,3 | 3,1 | 3,9 | 7,3 | 12,3 | 16,4 | 24,7 | 4,8 |

| U | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 | All |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1,0 | 123 | 106 | 30 | 59 | 111 | 122 | 99 | 68 | 44 | 24 | 14 | 57 | 45 |
| 2,0 | 169 | 168 | 51 | 114 | 189 | 178 | 150 | 94 | 70 | 49 | 28 | 97 | 75 |
| 3,0 | 132 | 173 | 80 | 170 | 214 | 201 | 180 | 135 | 103 | 102 | 50 | 92 | 105 |
| 4,0 | 85 | 143 | 118 | 169 | 195 | 147 | 169 | 140 | 139 | 136 | 63 | 94 | 119 |
| 5,0 | 84 | 138 | 177 | 161 | 120 | 107 | 141 | 130 | 137 | 164 | 80 | 88 | 128 |
| 6,0 | 95 | 118 | 205 | 152 | 72 | 80 | 101 | 129 | 116 | 152 | 109 | 104 | 130 |
| 7,0 | 107 | 73 | 163 | 90 | 32 | 50 | 64 | 104 | 96 | 135 | 133 | 101 | 115 |
| 8,0 | 83 | 41 | 94 | 51 | 23 | 37 | 41 | 68 | 83 | 102 | 144 | 98 | 94 |
| 9,0 | 41 | 9 | 52 | 20 | 9 | 29 | 22 | 50 | 67 | 71 | 141 | 87 | 74 |
| 10,0 | 27 | 11 | 16 | 5 | 13 | 21 | 11 | 33 | 49 | 40 | 102 | 68 | 48 |
| 11,0 | 20 | 6 | 6 | 4 | 11 | 15 | 10 | 18 | 34 | 15 | 66 | 50 | 30 |
| 12,0 | 16 | 3 | 4 | 1 | 5 | 6 | 7 | 10 | 27 | 6 | 39 | 33 | 18 |
| 13,0 | 8 | 5 | 2 | 2 | 3 | 3 | 2 | 8 | 17 | 2 | 18 | 15 | 9 |
| 14,0 | 8 | 2 | 1 | 0 | 1 | 4 | 1 | 5 | 8 | 2 | 7 | 11 | 4 |
| 15,0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 | 5 | 0 | 3 | 2 | 2 |
| 16,0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 17,0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 18,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22,0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

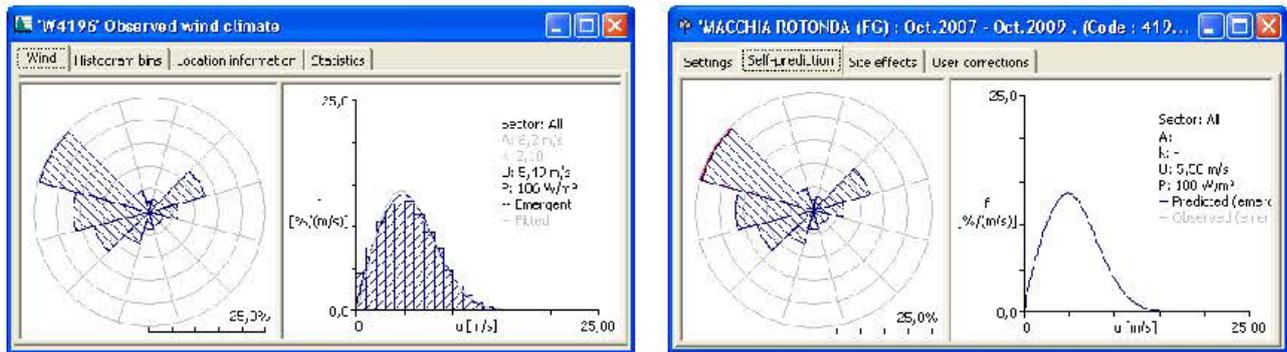
A and U are given in m/s, P in W/m² and the frequencies of occurrence in per mille and per cent (f).

Verifiche sul modello

Dovendo agire all'interno di un modello virtuale e volendo disporre di risultati analizzabili criticamente, prima di intraprendere qualunque attività di valutazione con WASP, occorre verificare che i dati in input al modello abbiano riprodotto un ambiente virtuale coerente con la realtà del sito.

Verifica dell'approssimazione della curva di Weibull

La verifica consiste nel confronto tra i parametri sperimentali (Measured) della stazione anemometrica, in termini di velocità media del vento e di potenza della vena fluida, e quelli stimati dal modello di calcolo, prima in astratto e poi calati nel contesto territoriale specifico del sito.



Distribuzione della ventosità della stazione 4196 in input al modello e ventosità stimata da WAsP

La prima verifica mette a confronto i parametri sperimentali con quelli della distribuzione di ventosità (Emergent) dedotta dal modello di calcolo.

| Codice stazione | | Unit | Measured | Emergent | Discrepancy |
|-----------------|--------------------|------------------|----------|----------|-------------|
| 4196 | Mean wind speed | m/s | 5,40 | 5,49 | 1,67 |
| | Mean power density | W/m ² | 184,28 | 186 | 0,93 |

La seconda verifica mette a confronto i parametri sperimentali con quelli stimati dal modello di calcolo nel punto spaziale dell'anemometro (self prediction) partendo dal campo di vento (Atlas).

| Codice stazione | | Unit | Measured | Self Prediction | Discrepancy |
|-----------------|--------------------|------------------|----------|-----------------|-------------|
| 4196 | Mean wind speed | m/s | 5,40 | 5,5 | 1,85 |
| | Mean power density | W/m ² | 184,28 | 188 | 2,02 |

Dalle verifiche si deduce la buona capacità del modello di riprodurre nel punto dell'anemometro la distribuzione del vento misurato, sia in termini di velocità media che di energia, tuttavia tendente a una certa sovrastima. Di tali approssimazioni si terrà conto nel prosieguo dello studio.

Verifica del gradiente al suolo della velocità del vento

Il gradiente al suolo della velocità del vento (alfa) è il parametro che consente di estrapolare la velocità del vento all'altezza del mozzo delle macchine. La verifica consiste nel definire l'approssimazione che WAsP introduce nel fare tale operazione che risulta poi determinante ai fini della stima della produzione attesa.

| Codice stazione | Dati misurati dagli anemometri alla loro altezza dal suolo | | | Dati stimati da WAsP all'altezza del mozzo delle macchine | | | Scarto sulla velocità media del vento |
|-----------------|--|-------------------------|--|---|-------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| | Altezza anemometro (m) | Velocità media (m/s) | Gradiente al suolo (con classi di vento > 4m/s) alfa | Altezza mozzo (m) | Velocità media (m/s) | Gradiente al suolo alfa | |
| 4196 | 50 | 5,40 | 0,287 | 80 | 6,2 | 0,255 | -1,498 |

La tabella riporta il confronto tra il gradiente al suolo sperimentale (tra i tanti disponibili al cap. Trattamento dei dati anemometrici, per prudenza, si è scelto quello più basso, comunque alto rispetto ai gradienti consueti) e il gradiente al suolo stimato da WAsP all'altezza del mozzo delle macchine; nell'ultima colonna è indicato lo scarto tra i due parametri, in termini di velocità del vento, che WAsP produce. Dallo scarto ottenuto si evidenzia che il modello di calcolo nell'estrapolare la velocità del vento all'altezza del mozzo delle macchine produce una leggera sottostima anche rispetto al gradiente sperimentale scelto.

Con atteggiamento conservativo, si terrà conto nell'analisi delle incertezze del calcolo, si accetta a questo punto l'interpretazione del modello di calcolo WAsP senza interventi correttivi delle sue stime.

Mapa di rugosità

La rugosità superficiale è determinata principalmente dall'altezza e tipologia di vegetazione che ricopre l'area di interesse e la zona estesa d'influenza aerodinamica al suolo.

Informazioni di rugosità sono rese disponibili dal progetto "Corinne Land Cover" che ricopre, attraverso l'ausilio di satelliti, gran parte della superficie terrestre. La mappa di rugosità ottenuta attraverso l'ausilio del progetto citato, è stata integrata con le informazioni aggiuntive e di dettaglio ottenute ed annotate durante l'ispezione di sito e attraverso l'integrazione e sovrapposizione di carte aerofotogrammetriche. Il risultato finale ottenuto è la mappa digitale di rugosità dell'area che ricopre una superficie di 60x60 Km dal centro della wind farm di progetto.

Densità dell'aria

La densità dell'aria in sito è stata calcolata basandosi sui dati climatologici (disponibili nel database di WindPro) relativi alla stazione più vicina all'area di progetto e riportata di seguito. La densità dell'aria media valutata all'altezza del mozzo delle turbine è stata calcolata in virtù della sua posizione geografica ed è pari a 1.177 kg/m³.

Classificazione di sito

Per le classi di progettazione le relative velocità del vento estreme ed intensità di turbolenza, si applica la norma IEC 61400-1 Ed.3. Modelli di turbolenza ed altre condizioni ambientali, quali la complessità topografica, sono altresì specificati come illustrato nella tabella che segue:

| Classe di aerogeneratori | | I | II | III | S |
|--------------------------|---------------|------|------|------|------------------------------------|
| V_{ref} | (m/s) | 50 | 42,5 | 37,5 | Valori specificati dal progettista |
| A | I_{ref} (-) | 0,16 | | | |
| B | I_{ref} (-) | 0,14 | | | |
| C | I_{ref} (-) | 0,12 | | | |

1. **Vref** è la velocità del vento di riferimento media su 10 minuti con un periodo di ricorrenza di 50 anni (carico nominale);
2. **A** indica la categoria con caratteristiche di turbolenza superiori;
3. **B** indica la categoria con caratteristiche di turbolenza medie;
4. **C** indica la categoria con caratteristiche di turbolenza inferiori;
5. **Iref** è il valore atteso dell'intensità della turbolenza a 15 m/s.;

Il valore della V_{ref} per la turbina Vestas V172, all'altezza del mozzo rientra nei parametri della classe II IEC, con estrapolazioni in diverse posizioni possibili in classe III. In fase esecutiva, sarà curato l'aspetto di valutazione preciso.

Turbolenza

I valori di turbolenza riscontrati nel caso specifico sono inquadrabili al di sotto della soglia limite di classificazione A della IEC 61400.

I fattori di perdita

| Sorgente della Perdita | Valore in % |
|------------------------------|---------------|
| Disponibilità aerogeneratori | -3,00% |
| Disponibilità B.O.P. | -0,50% |
| Disponibilità rete | -0,20% |
| Degradazione superficie pale | -1,00% |
| Perdite elettriche interne | -2,00% |
| Perdite elettriche esterne | -1,00% |
| Altre perdite | -1,00% |
| Perdite totali | -8,41% |

I fattori di perdita considerati riportati nella tabella rappresentano uno standard medio. Si ricorda che ciascuno dei suddetti fattori deve essere riconsiderato quando siano noti i corrispondenti valori calcolati o concordati contrattualmente.

Con il VESTAS V172 di potenza nominale massima pari 6.8 MW, la producibilità energetica netta complessiva risulta stimata in 225.759 MWh/annui, riconducibili a un numero ore/equivalenti anno di circa 2.750 h/a.

Analisi dell'incertezza

I parametri di incertezza considerati sono i seguenti:

- ✓ accuratezza delle misure del vento: si assume una incertezza del 3% considerato l'utilizzo di anemometri calibrati;
- ✓ stima della velocità media in relazione al periodo di misura di circa 24 mesi: si assume una incertezza del 3,5% poiché la stazione è stata storicizzata;
- ✓ variabilità della media annuale: tale valore è stato stimato un 5% per l'area geografica;
- ✓ estrapolazione del vento al mozzo: tale valore di incertezza è stato valutato 2% avendo operato scelte conservative nel processo di calcolo;
- ✓ accuratezza del modello di calcolo WAsP: il valore del 2% è stato dato in considerazione della semplicità del modello tridimensionale di un segmento di territorio piano;
- ✓ curve di potenza: l'incertezza del 5% è dovuta all'utilizzo di curve di potenza teoriche.