

- biogas ●
- biometano ●
- eolico ●
- fotovoltaico ●
- efficienza energetica ●
- waste to chemical ●

# Studio anemologico e calcolo della produzione attesa dall'impianto

Progetto definitivo

Impianto eolico di "Castellana Sicula"

Comuni di Castellana Sicula e Polizzi Generosa (PA)

Località "Cozzo Bagianello"



**N. REV. DESCRIZIONE**  
a Emissione

**ELABORATO**  
Serdea srl

**CONTROLLATO**  
Asja  
Castellana Polizzi srl

**APPROVATO**  
Serdea srl

IT/EOL/E-CASI/PDF/I/SA/035-a  
15/11/2022  
Via Ivrea, 70 - Rivoli (TO) Italia  
T +39 011.9579211  
F +39 011.9579241  
info@asja.energy

## INDICE

	PAGINA
1. PREMESSA .....	3
2. SCHEMATIZZAZIONE DELLE ATTIVITA' SVOLTE .....	4
3. INFORMAZIONI DISPONIBILI .....	4
4. UBICAZIONE DEL SITO E SUE CARATTERISTICHE .....	5
5. LA STAZIONE ANEMOMETRICA .....	7
6. DATI ANEMOMETRICI DISPONIBILI .....	11
7. PRINCIPALI ELABORAZIONI DATI ANEMOMETRICI .....	13
7.1 Distribuzione della velocità del vento .....	13
7.2 Distribuzione delle frequenze delle direzioni (rosa dei venti) .....	14
7.3 Distribuzione dei parametri di ventosità per direzione .....	15
7.4 Distribuzione dei parametri della ventosità per mese .....	16
7.5 Distribuzione della turbolenza .....	17
7.6 Distribuzione del gradiente al suolo .....	18
8. VALUTAZIONE DELLA VENTOSITA' DI LUNGO PERIODO .....	20
9. IL LAYOUT DI IMPIANTO .....	23
10. L'AEROGENERATORE .....	25
11. MODELLO DI CALCOLO .....	26
11.1 La mappa territoriale .....	27
11.2 Dati anemometrici in ingresso al modello .....	27
12. VERIFICHE SUL MODELLO .....	29
12.1 Verifica dell'approssimazione della curva di Weibull .....	29
12.2 Verifica del gradiente al suolo .....	30
12.3 Verifica di micrositing .....	30
12.4 Mappa di ventosità .....	31
13. PRODUZIONE LORDA ATTESA .....	32
14. PRODUZIONE NETTA ATTESA .....	33
15. ANALISI DI CONFIDENZA .....	34
15.1 Produzione attesa con data probabilità .....	36
16. CONCLUSIONI .....	37

## 1. PREMESSA

La Società *Asja Castellana Polizzi s.r.l.*, con sede legale a Torino in Corso Vittorio Emanuele II n. 6, intende realizzare un impianto per la produzione di energia elettrica da fonte eolica, composto da n. 7 aerogeneratori con potenza unitaria di 7,0 MW per una potenza complessiva di 49,0 MW ricadente nei territori comunali di Castellana Sicula (PA) e Polizzi Generosa (PA), denominato impianto eolico di "Castellana Sicula", in località "Cozzo Bagianello".

Come da STMG formalizzata da Terna S.p.A., l'impianto eolico sarà collegato alla Rete Elettrica di Trasmissione Nazionale (RTN) mediante un cavidotto a 36 kV, il cui tratto finale interessa il Comune di Villalba (CL), dove è ubicata la Cabina Utente (CU) che costituisce l'interfaccia per la consegna dell'energia immessa alla RTN presso la Stazione Elettrica (SE) di trasformazione 380/150/36 kV di Terna, denominata "Caltanissetta". Il collegamento tra la CU e la sezione a 36 kV della SE sarà realizzato mediante un breve tratto di cavidotto interrato.

Il presente studio specialistico si prefigge di analizzare le caratteristiche della risorsa eolica e di determinare la produzione attesa dall'impianto di "Castellana Sicula", nell'ambito del progetto definitivo.

Le valutazioni sono basate su una serie di dati di velocità e di direzione del vento, a diverse altezze dal suolo, di una stazione di misura che è stata operativa per oltre tre anni, posta nelle vicinanze del sito considerato. I risultati sono stati inoltre verificati con le serie di dati di altre due stazioni più prossime all'impianto in progetto.

La produzione attesa è stimata mediante idoneo software di modellazione della ventosità (WASP della DTU Wind Energy).

Le procedure e la metodologia impiegata fanno riferimento alla buona pratica del settore, alle cogenti Norme IEC per la loro parte di applicabilità, in particolare la IEC61400-12-1 e alle Linee Guida specifiche per dette valutazioni della risorsa eolica (MEASNET Power Performance Measurement Procedure V.3 Nov 2000, IEA 11. Wind Speed Measurement and use Cup Anemometry 1. Ed 1999).

## 2. SCHEMATIZZAZIONE DELLE ATTIVITA' SVOLTE

Schematicamente l'attività svolta può essere suddivisa nelle seguenti fasi:

- 1) Validazione ed elaborazione dei dati anemometrici d'area disponibili forniti dal Committente e di altre due serie di dati di altrettante stazioni prossime al previsto impianto;
- 2) Valutazione della ventosità di lungo periodo mediante confronti con dati di una stazione storica rappresentativa del più ampio territorio che ospita l'impianto;
- 3) Applicazione del modello di simulazione del campo di vento sull'area di interesse e verifiche del suo funzionamento;
- 4) Valutazione della produzione annua attesa dall'impianto in progetto sulla base dei dati anemometrici disponibili mediante modello, sia lorda, sia al netto delle perdite tipiche d'impianto;
- 5) Analisi di confidenza dei risultati ottenuti per la determinazione della P (75%) e della P (90%).

## 3. INFORMAZIONI DISPONIBILI

Per lo studio sono disponibili le seguenti informazioni, rese disponibili dal Committente:

- dati anemometrici, in formato originale dell'acquisitore (file giornalieri \*.ndf), relativi al periodo che va dal Luglio 2008 al Novembre 2011;
- localizzazione della stazione ed informazioni sulla sua gestione durante il periodo di monitoraggio;
- coordinate chilometriche della disposizione delle turbine in progetto (layout);
- tipo e caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore previsto nel progetto (dimensionamento e curva di potenza);
- una serie di dati di una stazione anemometrica storica che ha monitorato il territorio per oltre 30 anni;
- due serie di dati di altrettante stazioni anemometriche che hanno monitorato l'area di interesse per alcuni anni, rappresentative del sito dell'impianto in progetto.

#### 4. UBICAZIONE DEL SITO E SUE CARATTERISTICHE

Il sito eolico oggetto di studio si trova territorialmente nei Comuni di Castellana Sicula (PA), Polizzi Generosa (PA). La posizione del sito eolico nel territorio centro settentrionale della Sicilia è illustrata nella seguente immagine aerea tratta dal web. Esso dista circa 70 km dal capoluogo Palermo e la sua posizione nella parte centro settentrionale della Sicilia è illustrata nella seguente immagine aerea tratta dal web.

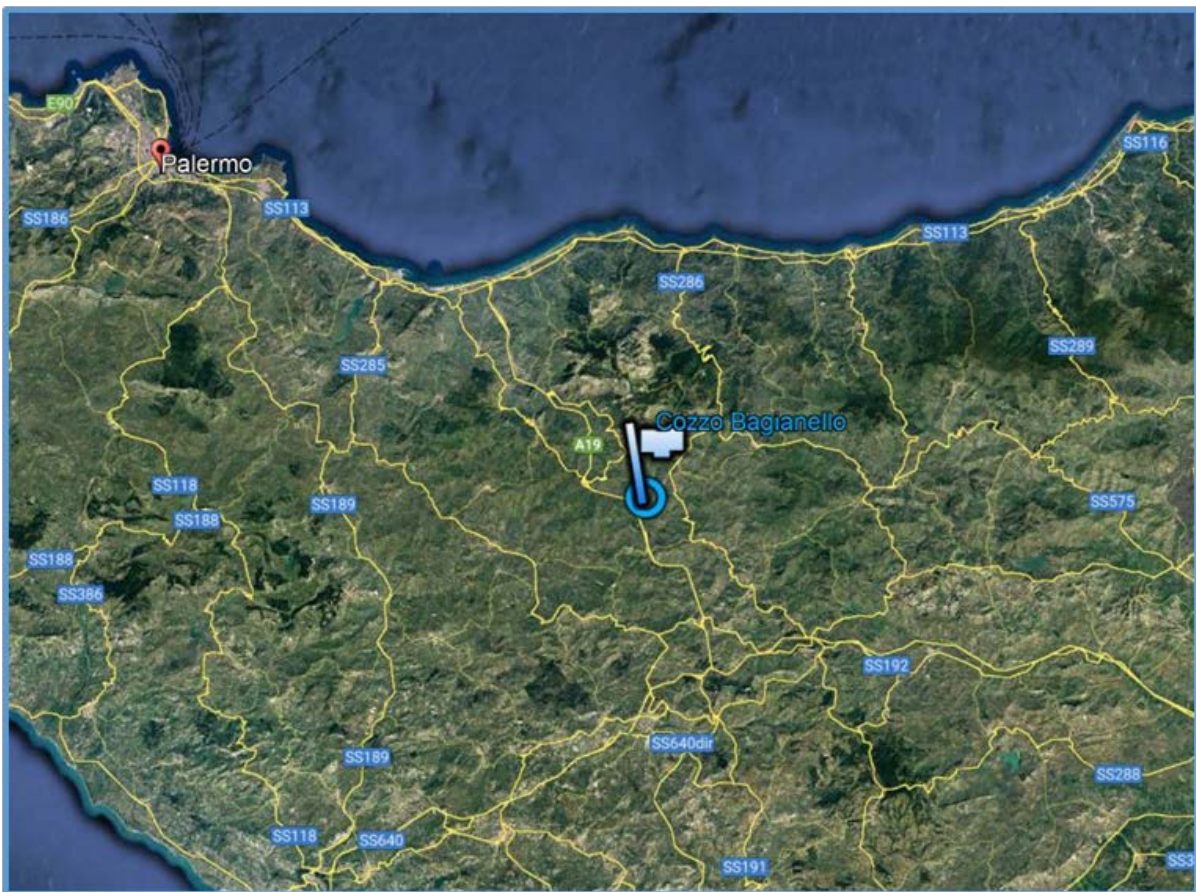


Figura 1: Foto aerea con inquadratura posizione sito eolico

Con maggior dettaglio, l'impianto si trova a sud del complesso montuoso delle Madonie ad alcuni chilometri di distanza dagli abitati di Castellana Sicula e di Polizzi Generosa come si evince dallo stralcio di cartografia stradale di seguito riportato.



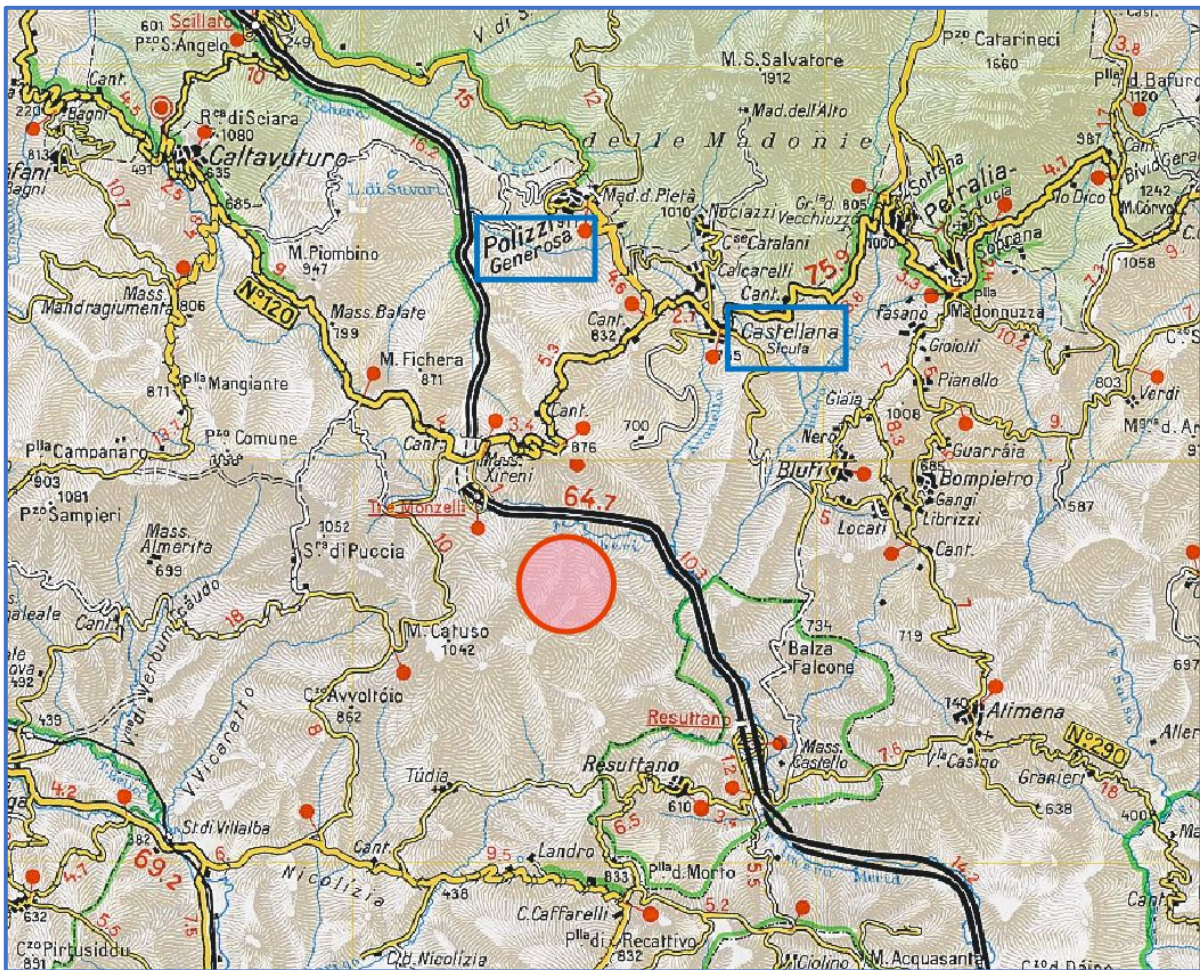


Figura 2: Cartografia stradale con la posizione del sito eolico

Per sito, in questo caso, si intende un'area di diversi chilometri quadrati circostante il previsto impianto. Esso presenta un territorio con una conformazione geomorfologica mediamente complessa, costituita da una serie di rilievi allungati con dolci acclivi intervallati da piccole valli, che da quota 500 m slm sale fino a 900 m slm. Risulta libera da occlusioni al passaggio del vento per diversi chilometri fino al mare lungo la direttrice Nord-Ovest/Sud-Est da dove provengono i venti predominanti. I rilievi di maggior altezza (1600-1900m slm si trovano ad oltre 15 km in direzione Nord.





Figura 3: Area del sito eolico su foto aerea

Il suolo è prevalentemente destinato ad attività di agricoltura e di pastorizia, attività alle quali sono adibite anche le poche costruzioni sparse presenti nelle campagne al di fuori dei centri abitati.

## 5. LA STAZIONE ANEMOMETRICA

Il Committente ha in corso l'installazione di una stazione anemometrica con torre tralicciata controventata di altezza pari a 90m, ubicata in una posizione rappresentativa e baricentrica all'impianto. Sarà dotata di una serie di anemometri a diverse altezze dal suolo e di altri sensori meteorologici. La rappresentazione grafica della stazione anemometrica è riportata nella seguente figura.

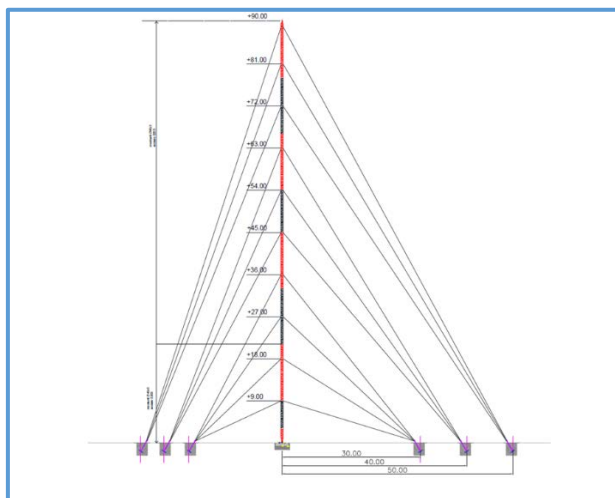


Figura 4: Stazione anemometrica

L'installazione in corso interessa il Comune di Castellana Sicula nella posizione individuata dalle seguenti coordinate;

- ✓ Coordinate Gradi decimali: Lat. 37.725416°; Long. 14,006035°
- ✓ Coordinate UTM WGS 84: 412407 E; 4175815 N (Fuso 33)
- ✓ Altitudine 738 m slm

Nella seguente figura è rappresentata, su cartografia IGM in scala 1:50.000, la posizione della stazione anemometrica rispetto a quella degli aerogeneratori in progetto:

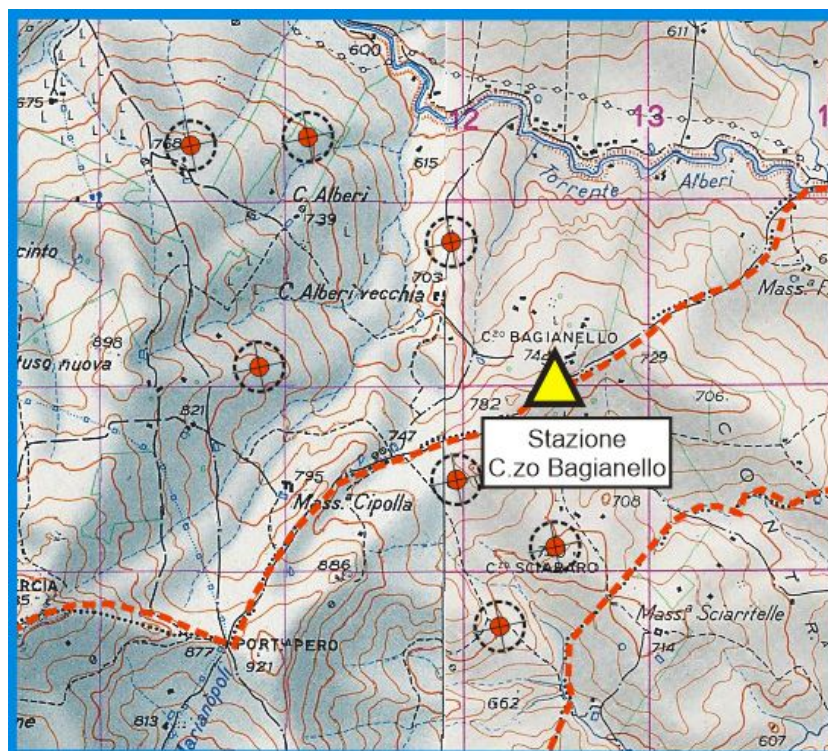


Figura 5: Posizione della stazione anemometrica rispetto agli aerogeneratori



Il presente studio utilizza i dati anemometrici della stazione denominata "POLIZZI GEN", contraddistinta dal codice DID14, che è costituita da un sostegno tubolare strallato di altezza pari a 40m. E' stata installata il 10/07/2008 ed ha operato per oltre tre anni. Essa dista circa 8 km dall'impianto in progetto, in direzione Ovest/Sud-Ovest, in posizione molto rappresentativa poiché sgombra da ostacoli in ogni direzione. Risulta posta sulla sommità di un rilievo ad una quota di circa 650 m slm.

Nel dettaglio, la sua ubicazione è di seguito riportata su uno stralcio della cartografia 1:50.000 dell'IGM.

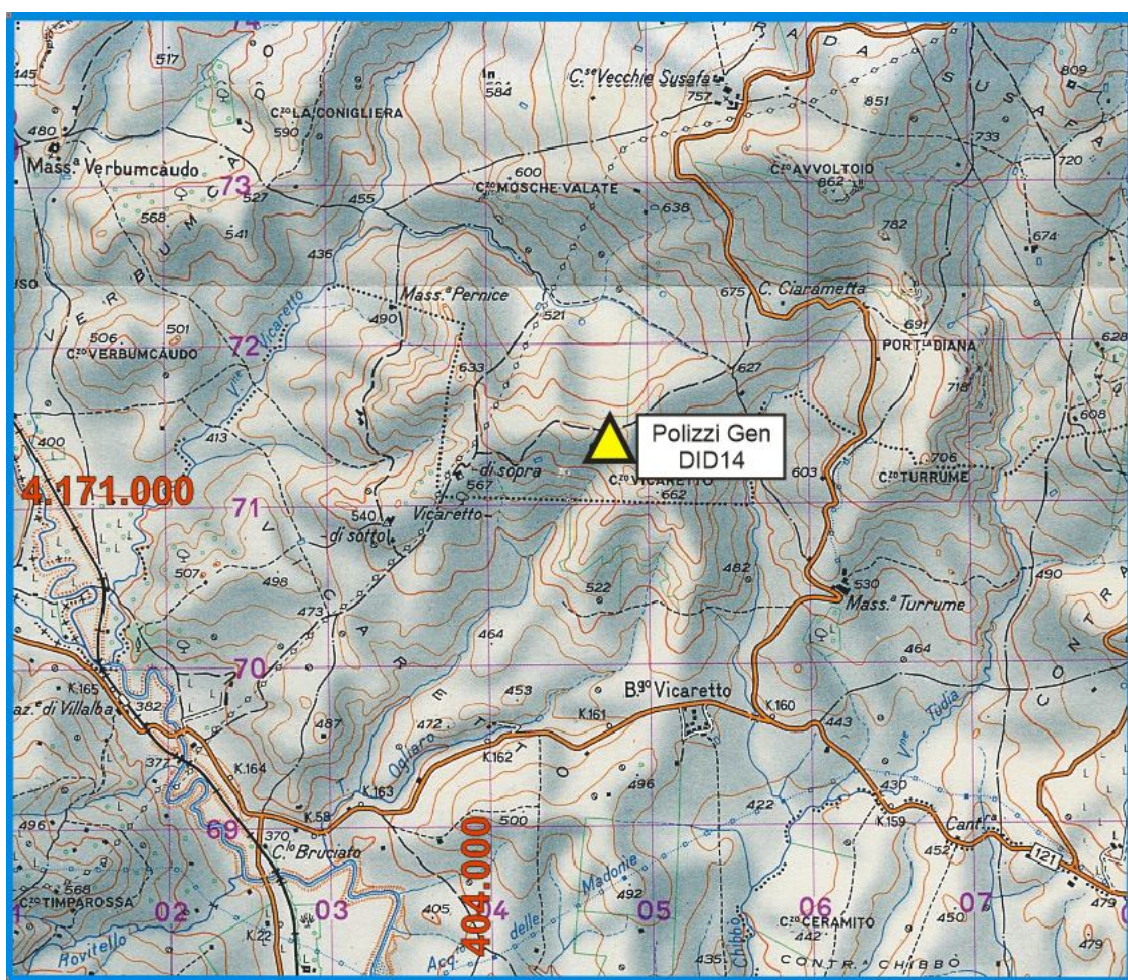


Figura 6: Posizione della stazione anemometrica di riferimento su carta IGM

Di seguito si riporta una rappresentazione fotografica verso il punto di misura in direzione Nord-Est da una distanza di circa 700 m.



Figura 7: Fotografia della stazione anemometrica di riferimento

La stazione è dotata di tre livelli di misura della velocità del vento, a 40-30-10 m, e di due per la direzione del vento, a 40-30 m. Essa è costituita da un sostegno tubolare di altezza pari a 40 m, sul quale, mediante mensole, sono collocati i sensori anemometrici di velocità e direzione. La stazione, denominata DID14, ha le seguenti principali caratteristiche:

- Regione: **Sicilia**
- Provincia: **Palermo**
- Comune: **Polizzi Generosa**
- Località: **Cozzo Vicaretto**
- Coordinate in metri nel sistema UTM ED50, Fuso 33:
- Longitudine: **404,561 E**; Latitudine : **4,171,427 N**
- Coordinate in metri nel sistema UTM WGS84, Fuso 33:
- Longitudine: **404,504 E**; Latitudine : **4,171,235 N**
- Altitudine (s.l.m.): **654 m**
- Orografia del punto di installazione: **sommità collinare**
- Orografia circostante: **collinare**
- Utilizzo del terreno: **coltivazioni cereali**
- Ostacoli verso Ovest-NordOvest: **nessuno**

- Tipo di sensori velocita: **NRG #40C Maximum Anemometer Calibrated**
- Tipo di sensori direzione: **NRG #200P**
- Tipo di acquirettore: **Second Wind NOMAD2**
- Matr. Acquisitore: **n. 06065**
- Altezze misura velocità: **40, 30, 10 m**
- Altezze misura direzione: **40, 30**

## 6. DATI ANEMOMETRICI DISPONIBILI

I dati anemometrici disponibili ricoprono un periodo di oltre tre anni, per lo studio in oggetto, è stato preso in considerazione quello che va dal 10 Luglio 2008 al 26 Novembre 2011.

La serie dei file giornalieri in uscita dall'acquisitore NOMAD 2 in formato \*.NDF è costituita da circa 1250 file unitari che contengono, per ognuno dei 10 minuti che coprono l'intero periodo (complessivamente oltre 170.000 intervalli unitari di misura), le seguenti grandezze anemologiche e meteorologiche:

Canale del Data Logger	Etichetta Colonna File NDF	Altezza dal suolo	Grandezza misurata	Unità di misura
C1	C1-Maximum #40(m/s) @ 40m -10 min Average	40 m	Velocità media	m/s
	C1-Maximum #40(m/s) @ 40m - 10 min Max Value		Velocità massima	m/s
	C1-Maximum #40(m/s) @ 40m -10 min Min Value		Velocità minima	m/s
	C1-Maximum #40(m/s) @ 40m -10 min Std Dev		Deviazione standard	m/s
C2	C3-Maximum #40(m/s) @ 30m -10 min Average	30 m	Velocità media	m/s
	C3-Maximum #40(m/s) @ 30m -10 min Max Value		Velocità massima	m/s
	C3-Maximum #40(m/s) @ 30m -10 min Min Value		Velocità minima	m/s
	C3-Maximum #40(m/s) @ 30m -10 min Std Dev		Deviazione standard	m/s
C3	C4-Maximum #40(m/s) @ 10m -10 min Average	10 m	Velocità media	m/s
	C4-Maximum #40(m/s) @ 10m -10 min Max Value		Velocità massima	m/s
	C4-Maximum #40(m/s) @ 10m -10 min Min Value		Velocità minima	m/s
	C4-Maximum #40(m/s) @ 10m -10 min Std Dev		Deviazione standard	m/s
A1	A1-NRG 200P(°) @ 40m North-10 min Vec Average	40 m	Direzione media	° sess.
	A1-NRG 200P(°) @ 40m North-10 min Vec Std Dev		Deviazione standard	° sess.
A2	A3-NRG 200P(°) @ 20m North-10 min Vec Average	30 m	Direzione media	° sess.
	A3-NRG 200P(°) @ 20m North-10 min Vec Std Dev		Deviazione standard	° sess.

Durante la fase di verifica della validità dei dati non sono emerse incongruenze e/o guasti alle apparecchiature. Si segnala unicamente l'assenza dei file originari del periodo 4/8/2010-31/08/2010 e del giorno 15/12/2010.



La verifica è stata svolta per confronto tra le misure dei sensori a diverse altezze e sulla base della conoscenza delle condizioni ambientali del territorio. La diponibilità dei dati validi, mensile e complessiva del periodo di monitoraggio, è riportata nella seguente tabella:

	Mese	Anno	Velocità 40m	Velocità 30m	Velocità 10m	Direzione 40m	Direzione 30m
DID14	7	2008	71%	71%	71%	71%	71%
	8	2008	100%	100%	100%	100%	100%
	9	2008	100%	100%	100%	100%	100%
	10	2008	100%	100%	100%	100%	100%
	11	2008	100%	100%	100%	100%	100%
	12	2008	100%	100%	100%	100%	100%
	1	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	2	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	3	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	4	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	5	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	6	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	7	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	8	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	9	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	10	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	11	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	12	2009	100%	100%	100%	100%	100%
	1	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	2	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	3	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	4	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	5	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	6	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	7	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	8	2010	11%	11%	11%	11%	11%
	9	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	10	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	11	2010	100%	100%	100%	100%	100%
	12	2010	97%	97%	97%	97%	97%
	1	2011	100%	100%	100%	100%	100%
	2	2011	100%	100%	100%	100%	100%
	3	2011	100%	100%	100%	100%	100%
4	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
5	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
6	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
7	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
8	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
9	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
10	2011	100%	100%	100%	100%	100%	
11	2011	83%	83%	83%	83%	83%	
<b>N° dati</b>	<b>177696</b>		<b>173579</b>	<b>173579</b>	<b>173579</b>	<b>173579</b>	<b>173579</b>
<b>Disponib. %</b>	<b>100%</b>		<b>97.7%</b>	<b>97.7%</b>	<b>97.7%</b>	<b>97.7%</b>	<b>97.7%</b>

Nel complesso la disponibilità di misure elementari risulta ottima.

## 7. PRINCIPALI ELABORAZIONI DATI ANEMOMETRICI

### 7.1 Distribuzione della velocità del vento

La curva di durata della velocità del vento riporta il tempo durante il quale il valore indicato viene superato. Di seguito si rende disponibile la tabella con la curva di durata del sensore di sommità.

STAZIONE ANEMOMETRICA : POLIZZI GEN - Regione: SICILIA (Cod.DID14)					
Periodo di elaborazione: 10/07/2008 - 26/11/2011 (numero giorni: 1235)					
Percentuale dati disponibili = 97.68 % ( 173579 dati su 177696 )					
Velocita' del vento V in m/s rilevata a 40 m dal suolo					
CURVA DI DURATA DELLA VELOCITA' DEL VENTO					
m/s	ore/anno	%	m/s	ore/anno	%
0.0	8759.9	100.00	0.5	8232.7	93.98
1.0	7793.9	88.97	1.5	7389.2	84.35
2.0	6943.3	79.26	2.5	6455.0	73.69
3.0	5953.9	67.97	3.5	5439.5	62.10
4.0	4950.8	56.52	4.5	4502.3	51.40
5.0	4075.3	46.52	5.5	3679.9	42.01
6.0	3310.6	37.79	6.5	2945.4	33.62
7.0	2612.1	29.82	7.5	2290.5	26.15
8.0	1995.0	22.77	8.5	1719.3	19.63
9.0	1469.9	16.78	9.5	1246.2	14.23
10.0	1043.1	11.91	10.5	871.5	9.95
11.0	715.9	8.17	11.5	580.1	6.62
12.0	463.1	5.29	12.5	375.6	4.29
13.0	300.1	3.43	13.5	239.8	2.74
14.0	189.4	2.16	14.5	152.3	1.74
15.0	122.1	1.39	15.5	100.6	1.15
16.0	82.5	0.94	16.5	67.7	0.77
17.0	56.2	0.64	17.5	47.9	0.55
18.0	41.2	0.47	18.5	34.6	0.40
19.0	28.6	0.33	19.5	24.6	0.28
20.0	19.4	0.22	20.5	15.3	0.17
21.0	12.1	0.14	21.5	10.2	0.12
<b>Parametri della distribuzione di Weibull :</b>			<b>Vc = 5.61</b>	<b>k = 1.34</b>	
Parametri della velocità del vento calcolati con la distribuzione di Weibull:					
Vmed = 5.16 m/s		sqmV = 3.89 m/s		Vcub = 7.65 m/s	
Potenza specifica della vena fluida			Pv = 274 W/m2		

Essa può anche essere rappresentata da una distribuzione di probabilità di Weibull, detta anche curva di durata teorica, la cui cumulata è data dalla formula:

$$F(V) = 100 * \exp [-(V/Vc)^k],$$

dove:

F(V)= % del tempo rispetto all'anno in cui dato valore è superato;

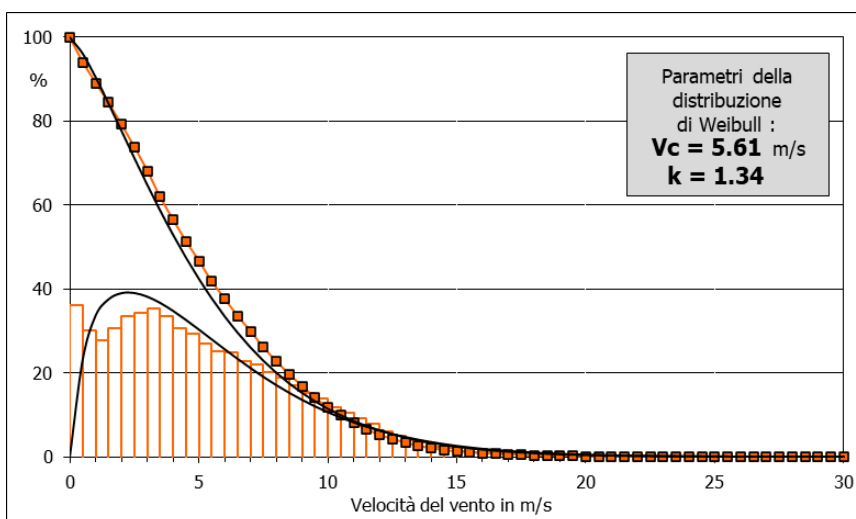
V = valore della velocità media nei 10 minuti;

Vc = valore della velocità caratteristica (fattore di scala)

K = fattore di forma

Questi ultimi parametri sono stimati mediante regressione dopo linearizzazione della distribuzione.

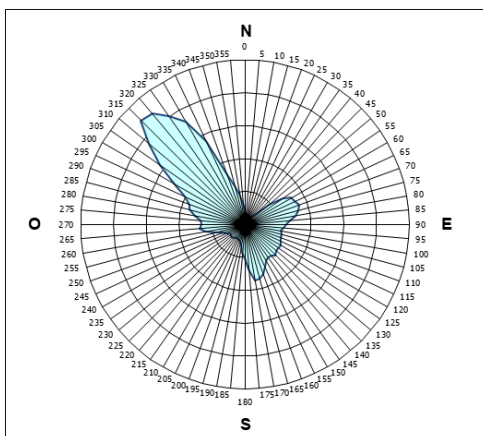
E' possibile anche rappresentare la distribuzione delle frequenze delle velocità del vento per intervalli di 0.5 m/s dei dati sperimentali (istogramma) e la corrispondente curva delle frequenze derivata dalla distribuzione di Weibull. Di seguito, tali rappresentazioni:



## 7.2 Distribuzione delle frequenze delle direzioni (rosa dei venti)

Il grafico sotto riportato rende evidente la distribuzione delle direzioni del vento rilevate dal sensore posto a 40 m, per settori di 5° sessagesimali, assegnata alla velocità del sensore a 30 m. Nei campionamenti non sono considerate le direzioni dei venti inferiori a 0.5 m/s (calme).





### 7.3 Distribuzione dei parametri di ventosità per direzione

Nella tabella seguente sono riportate le risultanze delle elaborazioni dei dati validi ai 12 settori nei quali è stato suddiviso l'angolo giro.

Sett.	%	n	Vmed (m/s)	sigV (m/s)	Vcub (m/s)	Vmax (m/s)	Pv (W/m <sup>2</sup> )	
N	3.4	5884	5.77	3.86	7.88	28.6	299	
NNE	1.2	2098	3.55	3.53	6.45	24.1	164	
ENE	8.4	14524	6.68	3.94	8.67	24.2	398	
E	8.0	13801	5.31	3.54	7.38	23.6	246	
ESE	7.3	12681	4.65	3.44	6.91	23.5	202	
SSE	8.2	14302	4.56	3.36	6.85	27.8	196	
S	6.9	12031	4.76	2.80	6.27	28.6	150	
SSO	3.0	5245	4.52	3.12	6.33	22.0	155	
OSO	3.7	6427	4.13	3.13	6.19	19.4	144	
O	8.1	14037	5.11	3.39	7.05	25.7	214	
ONO	16.0	27806	5.41	3.24	7.11	23.4	219	
NNO	19.8	34295	7.40	3.69	8.99	27.6	442	
NoDir	0.0	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	
<b>Calme</b>	6.0	10448	(velocità del vento minore o uguale a 0.5 m/s)					
<b>Totale =</b>		<b>173579</b>	<b>5.32</b>	<b>3.73</b>	<b>7.49</b>	<b>28.7</b>	<b>256</b>	

Per ogni riga sono riportati i parametri della velocità di maggior interesse:

- colonna 1: settore di direzione di provenienza del vento
- colonna 2: la frequenza percentuale rispetto la totalità dei campionamenti elementari (10 min)
- colonna 3: il numero dei campionamenti elementari
- colonna 4: la media aritmetica dei valori elementari
- colonna 5: lo scarto quadratico medio espresso come la radice quadrata della media della sommatoria degli scarti elementari

- colonna 6: la velocità media cubica espressa come la radice cubica della media della sommatoria delle velocità elementari elevate al cubo
- colonna 7: il valor massimo individuato tra tutti i valori di velocità massima dell'intervallo di misura elementare considerato (10 min)
- colonna 8: la potenza specifica del vento che rappresenta quella propria per unità di superficie ed è funzione della densità dell'aria e della velocità cubica secondo la relazione:

$$P_v = 1/2 \rho * V^3$$

Detta potenza nel tempo fornisce l'energia per unità di superficie che è possibile estrarre teoricamente dal vento. Moltiplicata per la superficie del rotore e opportunamente abbinata alla curva di potenza di un aerogeneratore determina la produzione attesa.

I settori del vento maggiormente frequenti, ed anche più produttivi, risultano essere di gran lunga quelli da Nord-Ovest.

#### 7.4 Distribuzione dei parametri della ventosità per mese

Nel seguito, per la medesima serie, si riportano i grafici delle misure di Vmed, Vmax, SigV e di Energia Specifica, con base mensile, per evidenziarne l'andamento nell'anno.

Mese	Meq.	Vmed (m/s)	sigV (m/s)	Vcub (m/s)	Vmax (m/s)	Pv (W/m <sup>2</sup> )	Ev (kWh/m <sup>2</sup> )
Dic	2.97	6.18	3.89	8.32	28.7	351	261
Gen	3.00	5.16	3.84	7.57	26.2	265	197
Feb	3.00	6.00	3.95	8.23	26.4	340	229
Mar	3.00	5.96	3.85	8.03	28.6	316	235
Apr	3.00	5.78	3.97	8.04	23.4	317	228
Mag	3.00	5.11	3.64	7.21	19.7	229	170
Giu	3.00	5.54	3.40	7.22	16.6	230	166
Lug	3.71	5.03	3.60	7.05	20.1	214	159
Ago	3.11	4.78	3.63	6.92	17.6	202	150
Set	4.00	4.75	3.39	6.73	24.2	186	134
Ott	4.00	4.76	3.52	6.91	25.6	201	150
Nov	3.83	5.35	3.84	7.69	27.2	277	199
Stagione		Vmed (m/s)	sigV (m/s)	Vcub (m/s)	Vmax (m/s)	Pv (W/m <sup>2</sup> )	Ev (kWh/m <sup>2</sup> )
Inverno (Dic - Feb)		5.77	3.92	8.05	28.7	318	703
Primavera (Mar - Mag)		5.61	3.84	7.78	28.6	287	634
Estate (Giu - Ago)		5.11	3.56	7.07	20.1	215	475
Autunno (Set - Nov)		4.95	3.60	7.13	27.2	221	483
Anno		5.36	3.75	7.53	28.7	260	2279

**Nota :** Meq. = Numero equivalente di mesi con rilevazione di dati

## 7.5 Distribuzione della turbolenza

Di seguito si riportano i valori di turbolenza del vento che sono dedotti dalle misure elementari del sensore posto a 40m. Si fa presente che questo parametro è particolarmente variabile in funzione dell'altezza dal suolo e dal range di velocità del vento nel quale è determinato. Come è intuitivo ipotizzare la turbolenza diminuisce all'aumentare della distanza dal suolo e della velocità. A titolo di esempio si consideri che per determinare la turbolenza ambientale del vento nella scelta di una classe di turbina i termini di riferimento sono una velocità di 15 m/s e l'altezza del mozzo.

Settore direzione	%	n	Tmed	sigT	T_5%	T_95%
Nord	3.6	5884	21.5	18.4	6.2	63.2
Nord-NordEst	1.3	2098	33.1	21.5	8.8	70.7
Est-NordEst	8.9	14524	15.1	12.3	6.9	47.9
Est	8.5	13801	17.3	13.7	7.2	52.5
Est-SudEst	7.8	12681	20.1	14.6	7.6	55.9
Sud-SudEst	8.8	14302	21.2	14.3	8.3	55.3
Sud	7.4	12031	22.4	15.0	8.8	56.8
Sud-SudOvest	3.2	5245	27.7	18.3	8.8	65.4
Ovest-SudOvest	3.9	6427	27.7	17.8	9.0	63.7
Ovest	8.6	14037	23.0	15.3	8.6	57.9
Ovest-NordOvest	17.0	27806	18.7	13.1	7.4	51.0
Nord-NordOvest	21.0	34295	14.8	11.8	6.3	41.6
Nessuna Direzione	0.0	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Totale =</b>	<b>94.0</b>	<b>163131</b>	<b>19.3</b>	<b>14.7</b>	<b>7.2</b>	<b>55.2</b>

Classe velocità m/s	%	n	Tmed	sigT	T_5%	T_95%
V < 4	39.9	65032	29.3	18.3	9.0	65.2
4 < V < 8	35.9	58568	14.0	5.8	7.1	25.0
8 < V < 12	18.6	30354	11.0	3.7	6.3	17.8
12 < V < 16	4.6	7543	10.3	3.1	6.2	16.2
16 < V < 20	0.8	1249	10.7	3.0	6.3	15.8
V > 20	0.2	385	10.2	2.6	6.4	14.9
<b>Totale* =</b>	<b>56.5</b>	<b>98099</b>	<b>12.7</b>	<b>5.3</b>	<b>6.7</b>	<b>22.6</b>

Nella tabella sono riportati parametri statistici relativi ai valori ottenuti per la turbolenza  $T$  del vento definita come rapporto percentuale tra il valore dello scarto quadratico medio della velocità del vento rilevato nei 10 minuti ed il corrispondente valore medio:

$$T = 100 \cdot sigV(10') / Vmed(10')$$



Il valore di turbolenza viene calcolato solo per velocità medie nei 10 minuti superiori a 0.5 m/s, in tabella i parametri statistici della variabile  $T$  sono classificati separatamente per settori di direzione e per classi di velocità.

In particolare, sono riportati:

- colonna 1 : settore di direzione o classe di velocità;
- colonna 2 : percentuale di occorrenze % (nel settore o nella classe);
- colonna 3 : numero di occorrenze  $n$  (nel settore o nella classe);
- colonna 4 : turbolenza media  $T_{med}$  (nel settore o nella classe);
- colonna 5 : scarto quadratico medio della turbolenza  $sigT$  (nel settore o nella classe);
- colonna 6 : valore percentile al 5%,  $T_{5\%}$  (nel settore o nella classe), esso rappresenta un valore minimo di turbolenza che è superato con una probabilità del 95%;
- colonna 7 : valore percentile al 95%,  $T_{95\%}$  (nel settore o nella classe), esso rappresenta un valore massimo di turbolenza che è superato con una probabilità del 5%.

La prima riga "Totale" rappresenta i parametri della distribuzione della turbolenza per tutte le velocità del vento superiori al valore di calma di 0.5 m/s, mentre la seconda riga "Totale\*£ (contrassegnata da \*) rappresenta i parametri della distribuzione della turbolenza solo per velocità del vento superiori a 4 m/s.

In questo "Totale\*" non vengono quindi considerate le classi di velocità molto basse, quelle più ricche di turbolenza ma meno produttive per gli aerogeneratori, e pertanto in esso sono riportati i parametri della distribuzione della turbolenza che più significativamente andrebbe ad interessare l'aerogeneratore.

## 7.6 Distribuzione del gradiente al suolo

Una delle grandezze di interesse per le successive valutazioni è la variazione della velocità del vento all'aumentare dell'altezza dal suolo. Essa, denominata gradiente al suolo o sinteticamente alfa, può essere descritta con la seguente Legge di Potenza:

$$V_2/V_1 = (h_2/h_1)^{\text{alfa}},$$

dove  $V_2$  e  $V_1$  sono le rispettive velocità del vento alle altezze dal suolo  $h_2$  e  $h_1$ .

Questo caratteristico parametro del vento dipende sostanzialmente dalla morfologia e dalla rugosità del terreno sul quale scorre la vena fluida del vento. La sua determinazione risulta importante poiché, per valutare la produzione attesa dall'aerogeneratore, le misure del vento disponibili (nel nostro caso a 40 m) devono essere estrapolate all'altezza del mozzo, tipicamente superiori.

**DISTRIBUZIONE DEL GRADIENTE AL SUOLO DELLA VELOCITA' VENTO**

alfa = Gradiente al suolo della velocità del vento rilevato tra 40 e 30 m dal suolo

Settore direzione	%	n	Amed	sigA	A_5%	A_95%
Nord	3.6	5687	0.081	0.375	-0.317	0.698
Nord-NordEst	1.2	1934	0.183	0.591	-0.582	1.296
Est-NordEst	8.9	14256	0.030	0.346	-0.298	0.440
Est	8.5	13549	0.009	0.363	-0.418	0.473
Est-SudEst	7.8	12404	-0.013	0.367	-0.390	0.512
Sud-SudEst	8.8	14025	0.140	0.356	-0.224	0.722
Sud	7.4	11823	0.107	0.338	-0.218	0.677
Sud-SudOvest	3.2	5061	0.075	0.371	-0.259	0.696
Ovest-SudOvest	3.9	6182	0.126	0.448	-0.373	0.913
Ovest	8.5	13654	0.118	0.412	-0.295	0.765
Ovest-NordOvest	17.1	27301	0.108	0.378	-0.239	0.684
Nord-NordOvest	21.2	33884	0.045	0.280	-0.204	0.375
Nessuna Direzione	0.0	0	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Totale =</b>	<b>92.0</b>	<b>159760</b>	<b>0.073</b>	<b>0.362</b>	<b>-0.275</b>	<b>0.619</b>

Classe velocità m/s	%	n	Amed	sigA	A_5%	A_95%
V < 4	38.6	61664	0.168	0.552	-0.531	1.137
4 < V < 8	36.7	58565	0.012	0.134	-0.211	0.216
8 < V < 12	19.0	30354	0.014	0.077	-0.139	0.109
12 < V < 16	4.7	7543	0.022	0.060	-0.097	0.092
16 < V < 20	0.8	1249	0.023	0.058	-0.090	0.098
V > 20	0.2	385	0.009	0.058	-0.102	0.094
<b>Totale senza V &lt; 4 =</b>	<b>56.5</b>	<b>98096</b>	<b>0.014</b>	<b>0.114</b>	<b>-0.186</b>	<b>0.177</b>

In particolare, sono riportati:

- colonna 1 : settore di direzione o classe di velocità;
- colonna 2 : percentuale di occorrenze % (nel settore o nella classe);
- colonna 3 : numero di occorrenze *n* (nel settore o nella classe);
- colonna 4 : gradiente al suolo medio *Amed* (nel settore o nella classe);
- colonna 5 : scarto quadratico medio del gradiente *sigA* (nel settore o nella classe);
- colonna 6 : valore percentile al 5%, *A\_5%* (nel settore o nella classe), esso rappresenta un valore minimo di gradiente al suolo che è superato con una probabilità del 95%;

- colonna 7 : valore percentile al 95%,  $A_{95\%}$  (nel settore o nella classe), esso rappresenta un valore massimo di gradiente al suolo che è superato con una probabilità del 5%.

La prima riga "Totale" rappresenta i parametri della distribuzione del gradiente al suolo per tutte le velocità del vento superiori al valore di calma di 0.5 m/s, mentre la seconda riga "Totale senza  $V < 4$ " rappresenta i parametri della distribuzione del gradiente al suolo solo per velocità del vento superiori a 4 m/s.

In questo secondo Totale non vengono quindi considerate le classi di velocità molto basse, quelle con alfa più influenzato dalle imprecisioni di misura ma meno produttive, e pertanto in esso sono riportati i parametri della distribuzione del gradiente al suolo che più significativamente andrebbe ad interessare il disco rotorico dell'aerogeneratore.

## 8. VALUTAZIONE DELLA VENTOSITA' DI LUNGO PERIODO

La serie di dati che si intende utilizzare per le successive valutazioni corrisponde ad un periodo di raccolta già sufficientemente ampio, pari ad oltre tre anni, ma con un'incertezza sul valor medio annuo di ventosità atteso nel lungo periodo di un valore prossimo al 4%. Per tale motivo è stato effettuato un confronto con dati contemporanei di una serie di lunga durata (30 anni) di una stazione di misura ben rappresentativa del territorio più ampio che ospita l'impianto. La storicizzazione risulta possibile se gli andamenti della ventosità sono in sintonia (per direzione e velocità) e se il fattore di correlazione è sufficientemente alto.

La stima della ventosità di lungo periodo è stata quindi effettuata con la seguente procedura:

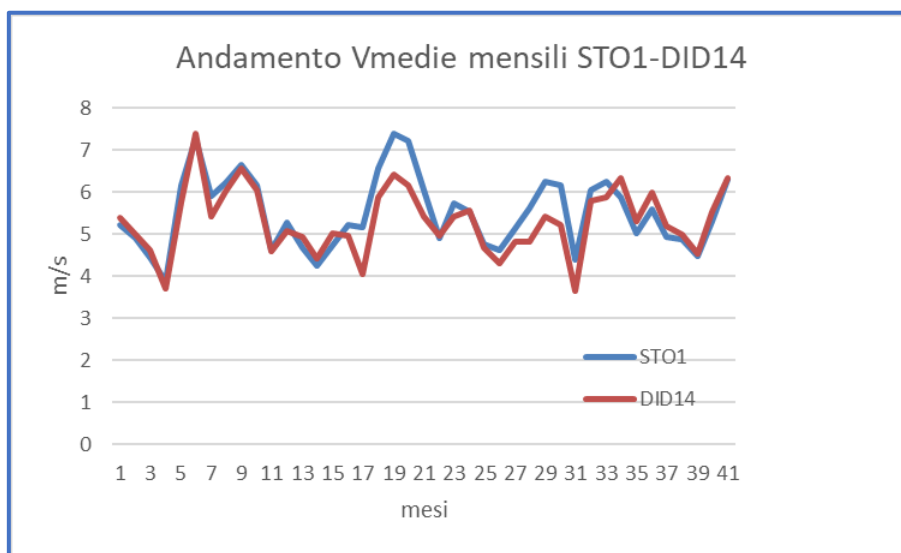
1. Confronto degli andamenti delle medie mensili;
2. Correlazioni tra i dati di velocità media mensile;
3. Storicizzazione dei dati di "POLIZZI GEN" mediante i risultati della correlazione.

La serie di dati storici utilizzata si riferisce ad una stazione di misura situata a circa 20 km ad Ovest da quella che si intende storicizzare, ad una quota di 650m slm e ben esposta ai venti predominanti di Nord-Ovest e Sud-Est che caratterizzano l'intero territorio della Sicilia centro-occidentale. Ha raccolto dati (intervallo 10min) di velocità media, massima, scarto quadratico medio e direzione per oltre 30 anni (1992-2022). La stazione, denominata STO1, ha le seguenti principali caratteristiche:

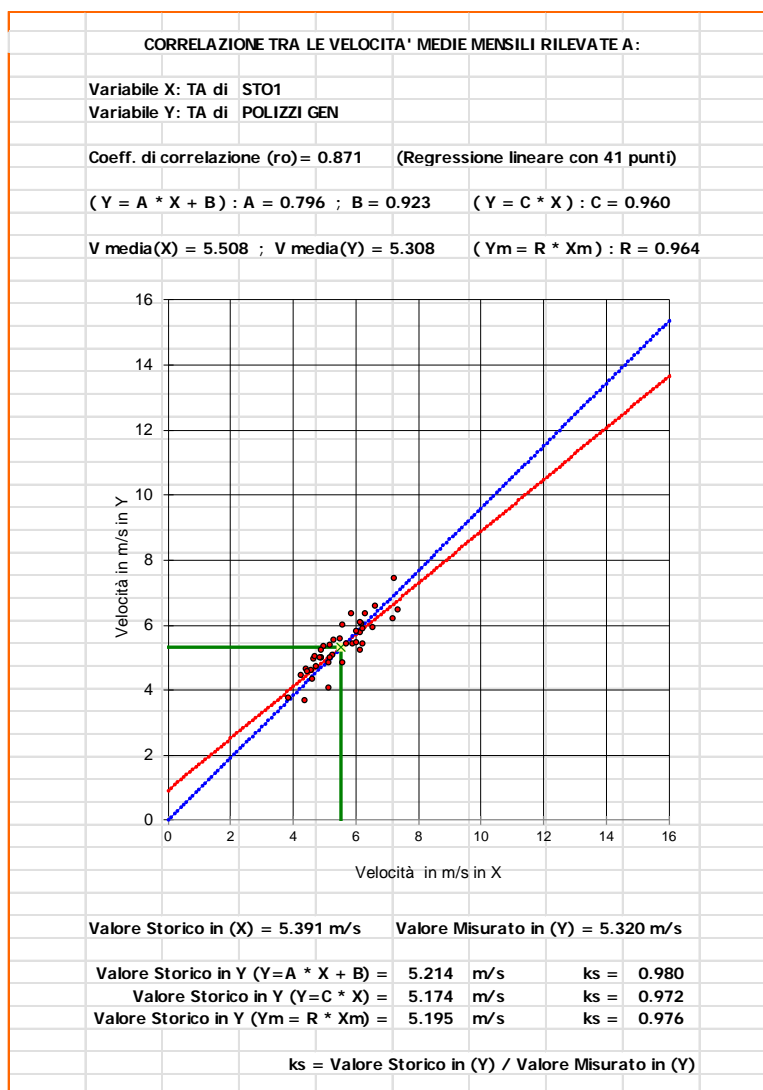


- Regione: **Sicilia**
- Provincia: **Palermo**
- Comune: **Castronuovo di Sicilia**
- Località: **Borgo Regalmici**
- Coordinate in metri nel sistema UTM WGS84, Fuso 33:
- Longitudine: **386,800 E**; Latitudine : **4,173,530 N**
- Altitudine (s.l.m.): **650 m**
- Orografia del punto di installazione: **sommità collinare**
- Orografia circostante: **collinare**
- Utilizzo del terreno: **coltivazioni cereali**
- Ostacoli verso Ovest-NordOvest: **nessuno**
- Tipo di sensori velocità: **NRG #40C Maximum Anemometer Calibrated**
- Tipo di sensori direzione: **NRG #200P**
- Altezza misura velocità e direzione: **15 m**

Nel seguente grafico sono riportati gli andamenti delle velocità medie mensili del periodo contemporaneo che, come si può osservare, risultano omogenei.



Nell'immagine di seguito riportata sono resi disponibili i parametri caratteristici di detta correlazione mettendo in evidenza il coefficiente di correlazione, che abbinato alla consistenza del numero di valori correlati, esprime la bontà/validità del procedimento.



Nelle informazioni contenute nell'immagine ritroviamo:

- **ρ** = Coefficiente di correlazione (abbinato al numero dei punti considerati)
- **A, B** = parametri della retta di regressione senza la condizione del passaggio per lo zero
- **R** = rapporto tra le medie (dei soli valori contemporanei)

I parametri della retta di regressione ottenuta come sopra indicato possono essere utilizzati come fattori di trasformazione della distribuzione del vento da un punto all'altro dell'area. Infatti, tali fattori spiegano, se pur in modo molto esemplificativo, i fenomeni di accelerazione o decelerazione della vena fluida del vento che scorre su un'area interessata dagli stessi venti.

Per tanto i parametri di tale retta, intesa come funzione di trasformazione della intensità del vento da un punto all'altro dell'area, possono essere considerati validi anche nel tempo e quindi utilizzati per valutare la ventosità di lungo periodo del sito che ospita la stazione di cui si dispongono meno dati rispetto a quella ritenuta storica.

Utilizzando i parametri ottenuti, si può affermare che:

$$\bar{V}_{(SITO, \text{dati contemporanei})} = a \cdot \bar{V}_{(STORICA, \text{dati contemporanei})} + b$$

E per analogia che:

$$\bar{V}_{(SITO, \text{dati storici})} = a \cdot \bar{V}_{(STORICA, \text{dati storici})} + b$$

Nel caso specifico utilizzando i parametri a e b che appartengono alla retta di regressione della correlazione sopra descritta, che minimizza lo scarto quadratico dei residui, si ottiene che la velocità media di "POLIZZI GEN" nel lungo periodo si stima sia da diminuire del 2% rispetto a quella misurata (ks=0.98).

Dopo un'elaborazione dei valori elementari così incrementati, ne derivano, per il sensore a 40 m, i seguenti parametri caratteristici di ventosità:

Codice	Denominazione	Periodo	H misura	V med	Energia	Param. distribuzione	
		(mesi)	s.l.s.	(m/s)	(W/m <sup>2</sup> )	Vc (m/s)	k
<b>DID14_S</b>	POLIZZI GEN	40	40	5.21	242	5.49	1.34

## 9. IL LAYOUT DI IMPIANTO

Per quanto qui di interesse, per layout di impianto si intende la localizzazione delle turbine in progetto rispetto al territorio, con particolare riferimento alle loro inter-distanze e all'elevazione sul livello del mare che, si fa presente, deriva dall'interpolazione tra le curve di livello della mappa posta in ingresso al modello (Vedi successivo Cap.11.1). Nella seguente tabella le coordinate sono espresse nei sistemi piani cartesiani (UTM) WGS84 e ED 50, fuso 33.

AG	ED50		WGS84		Quota (m slm)
	Long.	Lat.	Long.	Lat.	
CS01	410492	4177331	410435	4177139	751
CS02	411128	4177376	411071	4177184	698
CS03	411887	4176783	411830	4176591	677
CS04	410858	4176124	410801	4175932	789
CS05	411946	4175518	411889	4175326	769
CS06	412505	4175138	412448	4174946	718
CS07	412202	4174699	412145	4174507	696

L'impianto si situa in un'area collinare ad una quota media di circa 700 m slm. L'immagine seguente, su cartografia in scala 1:50000 (i nodi della griglia distano 1 km), evidenzia la localizzazione degli aerogeneratori:

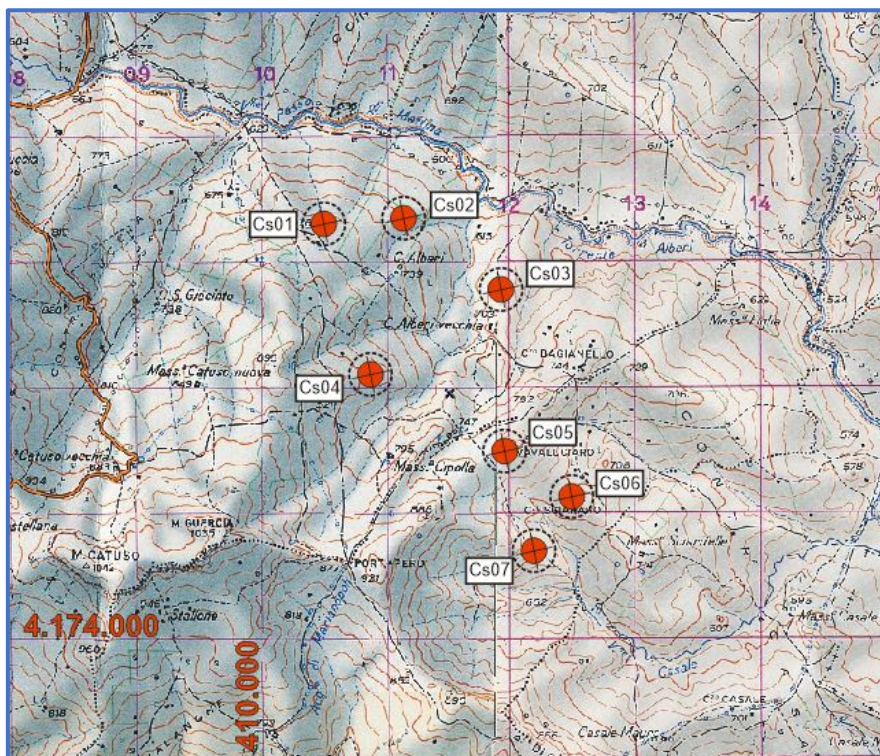


Figura 8: Posizione aerogeneratori su carta IGM

Di seguito si riporta una ricostruzione della visione dell'impianto su immagine tratta dal web.





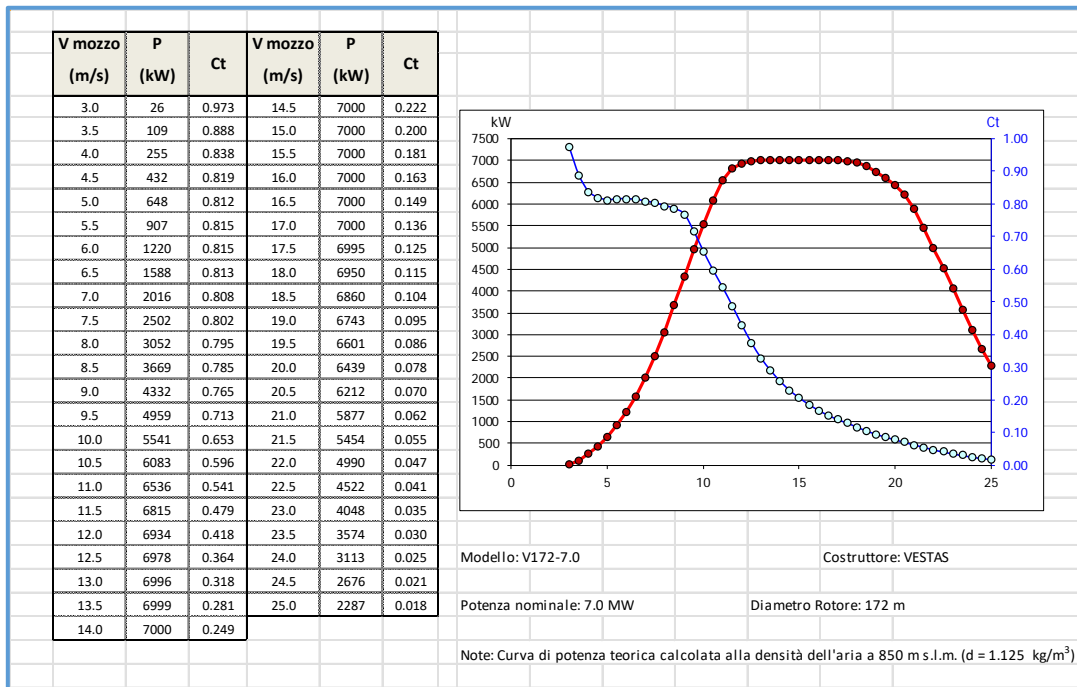
Figura 9 Area con la posizione degli aerogeneratori

## 10. L'AEROGENERATORE

L'aerogeneratore impiegato nel progetto è una macchina di grande taglia, di nuova concezione con rotore di ampie dimensioni. Trattasi della VESTAS V172 – 7.0 MW prodotta dal costruttore omonimo avente le seguenti caratteristiche di maggior interesse:

- Potenza nominale = 7.0 MW
- Velocità di cut-in = 3 m/s
- Velocità di cut-out = 25 m/s
- Diametro rotore = 172 m
- Area spazzata = 23.235 m<sup>2</sup>
- Altezza mozzo = 135 m sls

La sua curva di potenza (in Mode PO7200), così come fornita dal Costruttore, necessaria per le successive valutazioni di produzione attesa è riferita a una densità dell'aria di 1.125 kg/m<sup>3</sup> (corrispondente a 850 m slm= quota media del sito + H mozzo)). Essa viene nel seguito rappresentata:



## 11. MODELLO DI CALCOLO

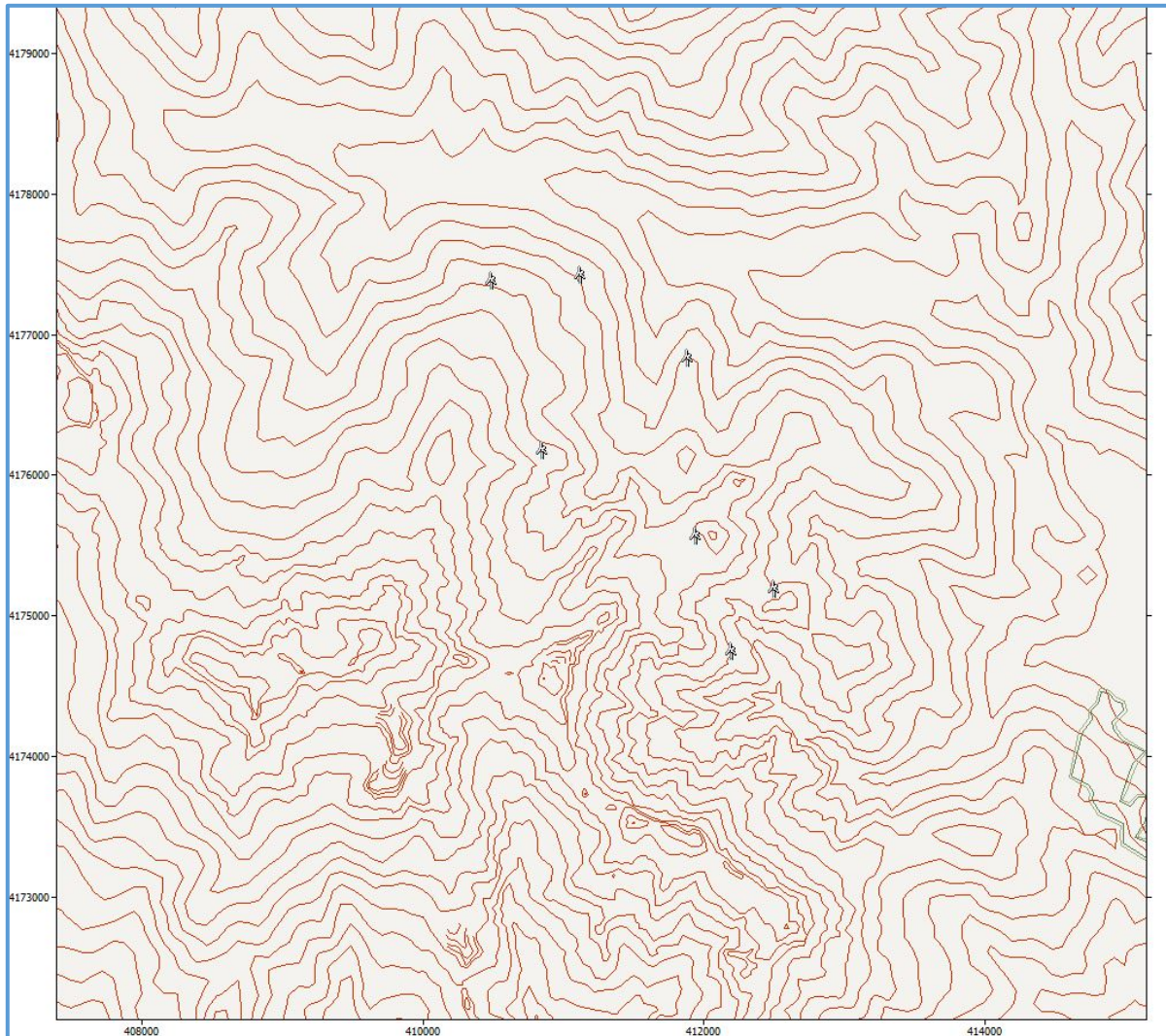
Le elaborazioni di seguito svolte sono state effettuate con il codice (o modello) di calcolo WASP ver.10.2 (Wind Atlas Analysis and Application Program) messo a punto dal RISO (Risoe National Laboratory) basato su un modello matematico del flusso del vento.

Il modello, che necessita in ingresso di una mappa contenente curve isometriche di quota e di rugosità ed anche di dati anemometrici di un definito punto del territorio, calcola dapprima il vento geostrofico indisturbato ad una consistente altezza dal suolo (Atlas) e costruisce poi un campo di vento alla quota di interesse (quella del mozzo) mediante algoritmi che calcolano punto per punto, in un sistema x,y,z, le accelerazioni e le decelerazioni della vena fluida tenendo conto per ogni direzione delle variazioni di quota e di rugosità (e la presenza di eventuali ostacoli).

Il funzionamento del modello è stato verificato con esiti positivi attraverso le prove di rappresentatività della distribuzione di Weibull e della quantificazione dell'errore commesso sulla verticale della stazione anemometrica.

## 11.1 La mappa territoriale

L'area di applicazione del modello è stata nel nostro caso pari a circa 600 km<sup>2</sup>, un rettangolo di 20 x 30 km con curve di livello con passo a 25 m centrato sull'impianto in progetto. Di seguito ne viene rappresentato uno stralcio.



La rugosità, mediamente con bassi valori essendo l'area priva di vegetazione di alto fusto e con pochi centri abitati, è stata tratta da immagini satellitari.

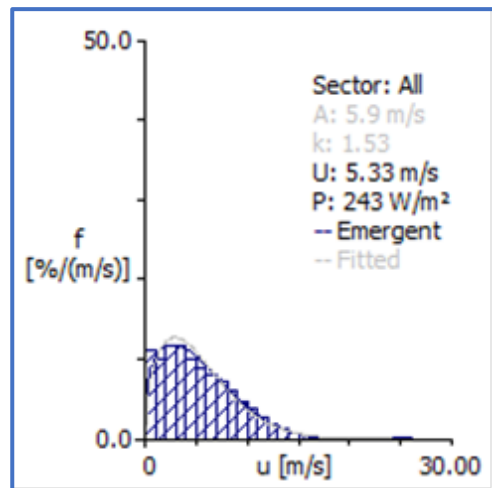
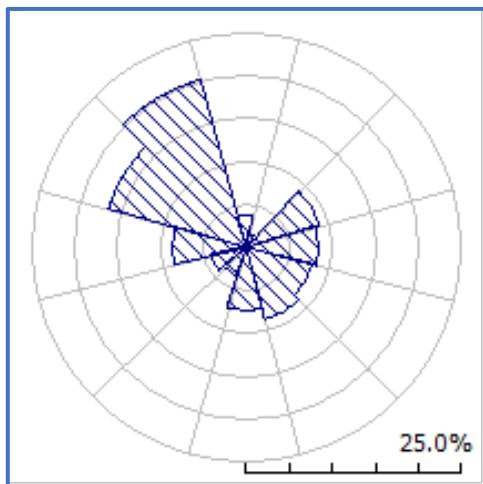
## 11.2 Dati anemometrici in ingresso al modello

I dati anemometrici, che corrispondono a quelli raccolti dal sensore posto a 40 m nella stazione di "POLIZZI GEN" per i 40 mesi considerati e storicizzati con un Ks pari a 0.98, come indicato nel capitolo 8, sono forniti al modello come distribuzione per bin di velocità (di 1 m/s) e per

direzione (12 settori di 30° sessagesimali) che li interpreta come di seguito rappresentato in tabella. La numerosità dei campionamenti di ogni casella è espressa in millesimi.

Velocità m/s	N	N-NE	NE-E	E	E-SE	SE-S	S	S-SO	SO-O	O	O-NO	NO-N	Totale
	Settore 1	Settore 2	Settore 3	Settore 4	Settore 5	Settore 6	Settore 7	Settore 8	Settore 9	Settore 10	Settore 11	Settore 12	
	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰	‰
1	190	401	93	115	142	109	107	190	194	133	82	57	112
2	105	178	61	100	143	134	103	136	154	120	94	52	99
3	84	114	78	122	162	187	128	137	175	130	121	61	117
4	81	89	98	131	126	167	153	133	140	119	130	69	116
5	79	62	103	127	100	111	136	88	94	98	116	69	100
6	82	38	101	103	90	78	105	73	67	85	104	76	88
7	73	25	93	75	72	53	95	66	45	76	94	89	80
8	70	16	74	58	46	47	70	50	30	65	78	106	71
9	62	19	60	39	31	32	44	43	29	57	61	105	59
10	48	10	56	33	20	22	23	32	19	40	42	98	47
11	43	8	51	28	17	15	15	19	14	27	29	78	37
12	32	8	38	21	14	10	8	16	15	18	18	57	26
13	21	7	28	14	10	9	6	8	9	12	11	35	17
14	11	4	24	10	6	7	2	5	6	8	7	22	12
15	6	8	16	9	4	5	1	2	5	3	4	10	7
16	6	7	9	6	4	4	1	2	3	2	3	5	4
17	4	2	6	4	3	2	0	1	2	1	2	3	3
18	2	1	3	1	3	2	0	0	1	1	2	2	2
19	0	1	2	2	2	2	0	0	1	1	1	1	1
20	0	1	2	2	3	2	0	0	0	1	1	1	1
21	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1
22	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0
23	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0
24	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

La distribuzione di ventosità corrisponde alle seguenti rappresentazioni grafiche:





## 12. VERIFICHE SUL MODELLO

Dovendo agire all'interno di un modello virtuale e volendo disporre di risultati analizzabili criticamente, prima di intraprendere qualunque attività di calcolo occorre verificare che i dati offerti al modello abbiano prodotto un ambiente virtuale congruo con la realtà del sito, entro cui poi calare ogni simulazione.

### 12.1 Verifica dell'approssimazione della curva di Weibull

Il codice di calcolo WASP utilizza la distribuzione di Weibull per rappresentare i dati di vento e definisce il campo di vento indisturbato sull'area (Atlas) con i parametri derivati da tale distribuzione. Le differenze introdotte in termini di velocità media e di energia della vena fluida per i dati di input della stazione considerata, sono riportate nella tabella che segue.

	Unit	Measured		Emergent	Discrepancy
<b>Mean wind speed</b>	m/s	5.21		5.33	<b>+2.3%</b>
<b>Mean power density</b>	W/m <sup>2</sup>	242		243	<b>+0.4%</b>

Un'ulteriore verifica consiste nel quantificare l'entità delle approssimazioni dovute al calcolo tramite il confronto tra il valore della velocità media e della potenza della vena fluida in input (distribuzione di Weibull) e quelli stimati dal modello nello stesso punto spaziale dell'anemometro sulla base dei parametri che definiscono l'Atlas (self prediction).

I risultati di questa prova sono stati i seguenti:

	Unit	Measured	Self	Discrepancy
<b>Mean wind speed</b>	m/s	5.21	5.37	<b>+3.1%</b>
<b>Mean power density</b>	W/m <sup>2</sup>	242	245	<b>+1.2%</b>

Le differenze riscontrate sono nel range di quelle attese per questo tipo di modellazione e, in particolare, sono piuttosto contenute quelle dell'energia del vento.



## 12.2 Verifica del gradiente al suolo

Per valutare il funzionamento del modello, una delle prove che è opportuno svolgere consiste nel monitorare l'andamento del gradiente nei diversi strati della vena fluida nel punto di origine della misura. Disponendo di misure strumentali è possibile anche, per le altezze disponibili, verificarne la congruenza con le stime del modello e/o con quanto atteso in relazione alla morfologia e rugosità del terreno.

La verifica è stata effettuata considerando i dati misurati a 40-30 e 10 m da DID14 ed utilizzando in ingresso al modello la serie di dati raccolta dalla stazione a 40 m dal suolo.

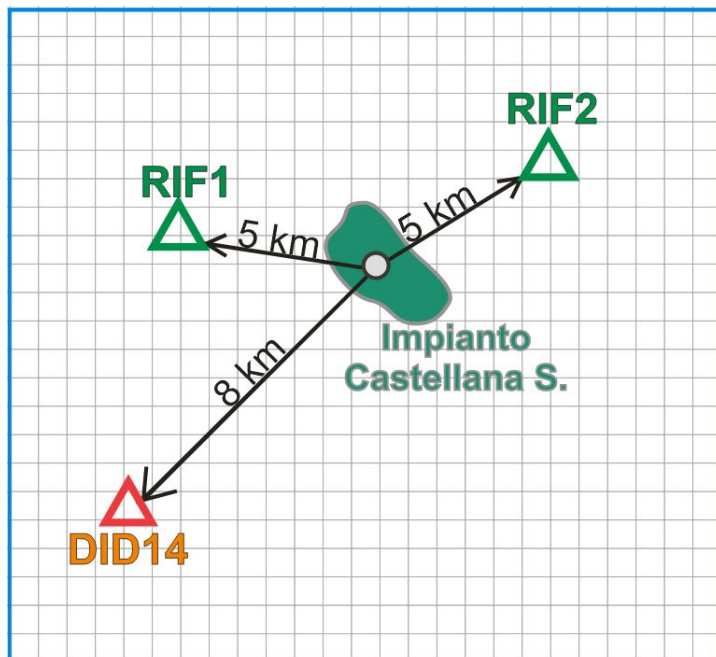
h sls (m)	Vm misurato (m/s)	H1-H2	alfa misurato	Vm Stima di WaSP (m/s)	H1-H2	alfa stimato
10	5.14			4.52		
30	5.27	10/30	0.073	5.23	10/30	0.132
40	5.32	30/40	0.024	5.48	30/40	0.162

Il modello sovrastima il gradiente al suolo nel punto di misura e di questo si dovrà tener conto nel proseguo delle attività di valutazione.

## 12.3 Verifica di micrositing

La simulazione del campo di vento in un dato territorio effettuata mediante modelli matematici, seppur basata su dati effettivamente misurati da una stazione anemometriche rappresentativa, è affetta da imprecisione dovuta ai limiti propri degli algoritmi impiegati.

La verifica degli errori commessi dalla simulazione può essere messa in evidenza dal confronto tra le stima di ventosità in un dato punto spaziale (x,y,z) indicata dal modello con la misura effettuata nel medesimo punto. L'entità dell'errore (differenza tra il valore stimato e quello misurato) esemplifica la bontà o meno della simulazione. Nel nostro caso si dispone di tre serie di dati di altrettante stazioni appartenenti al medesimo territorio: DID14, RIF1, che dista circa 5 km a N-NE da DID14, e RIF2, posta a 13 km a NE da DID14. L'impianto in progetto risulta baricentrico rispetto alle tre stazioni come di seguito rappresentato.



L'impiego delle serie di dati di RIF1 e di RIF2 comporta errori dell'ordine di alcuni punti percentuali come è logico attendersi per confronti in un territorio mediamente complesso ma risulta di conforto in termini di valutazione della produzione attesa dall'impianto in progetto, in particolare con l'impiego della serie di RIF2, come si evince dalla seguente tabella:

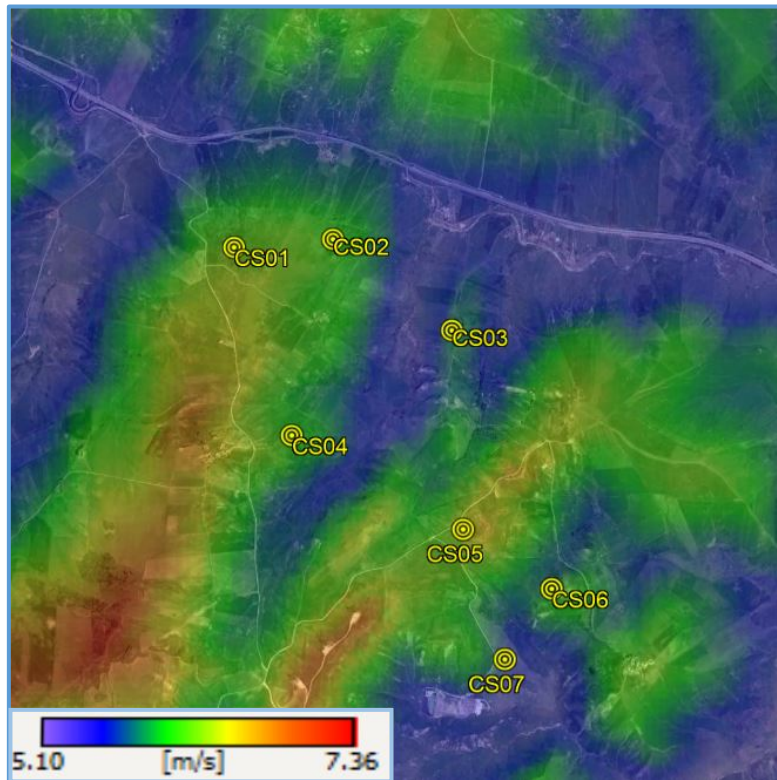
DATI IN INGRESSO	IMPIANTO	Quota media (m)	H mozzo (m)	Vm mozzo (m/s)	PROD. (p.u.)
RIF1	Castellana Sicula	728	135	6.38	1.109
RIF2				6.01	1.020
DID14_S				6.03	1.000

I risultati delle simulazioni con le due stazioni aggiuntive confermano la produzione attesa ottenuta con i dati della stazione DID14 di cui nel capitolo seguente, anzi ne indicano una sottostima. Di tale indicazione si terrà conto nel seguito delle valutazioni.

## 12.4 Mappa di ventosità

Un'ulteriore opportunità offerta dal modello è quella di poter realizzare una mappa di ventosità del territorio circostante l'impianto, cioè quella di rappresentare le aree di pari velocità del

vento e di verificare come questa grandezza sia particolarmente correlata alla quota sul livello del mare, come rappresentato nell'immagine seguente.



La mappa è stata ottenuta ad una altezza dal suolo pari a 135m (altezza del mozzo) su una griglia con nodi equidistanti 50 m per un'area di 12 km<sup>2</sup>per complessivi 4800 punti.

### 13. PRODUZIONE LORDA ATTESA

Dopo la costruzione del campo di vento, il modello, per ogni punto del territorio e ad ogni altezza dal suolo, stima la ventosità in termini di velocità e di contenuto energetico corrispondente alla distribuzione data.

Se, a questa ventosità, viene abbinata una determinata curva di potenza, il modello è in grado di restituire una produzione lorda attesa da data turbina per unità di tempo (nel caso specifico: media annua).

In sintesi si ricorda che i dati forniti sono quelli raccolti dal sensore posto a 40 m della stazione di "POLIZZI GEN" (Cod. DID14\_S) dopo la loro validazione/storicizzazione, che la mappa è quella descritta nel Cap. 11.1 e che la curva di potenza è quella della VESTAS V172 di cui al Cap. 10. Su queste basi, per il caso in oggetto, i risultati delle valutazioni sono riportati nella seguente tabella:

VESTAS V172 Pn= 7.0 MW Drotore=172 m H mozzo =135m									
AG	Coord. ED50		Quota [m slm]	H mozzo [m]	Vm [m/s]	Prod. Lorda [GWh]	Prod netta [GWh]	Perd. Scia [%]	Ore annue eq. [GWh/GW]
	X [m]	Y [m]							
CS01	410492	4177331	751	135	6.28	18.982	18.193	4.2	2599
CS02	411128	4177376	698	135	6.07	17.929	17.136	4.4	2448
CS03	411887	4176783	677	135	5.82	16.501	15.388	6.7	2198
CS04	410858	4176124	789	135	6.06	17.839	17.085	4.2	2441
CS05	411946	4175518	769	135	6.40	19.672	18.218	7.4	2603
CS06	412505	4175138	718	135	5.93	17.094	15.514	9.2	2216
CS07	412202	4174699	696	135	5.63	15.504	14.522	6.3	2075
<b>MEDIA</b>			<b>728</b>	<b>135</b>	<b>6.03</b>	<b>17.646</b>	<b>16.579</b>	<b>6.1</b>	<b>2368</b>
					<b>TOTALE</b>	<b>123.521</b>	<b>116.056</b>		

#### 14. PRODUZIONE NETTA ATTESA

La produzione attesa di cui sopra non tiene conto delle tipiche perdite d'impianto che devono essere considerate per ottenere la produzione che può effettivamente essere immessa in rete.

Considerando che non sono da considerare quelle per effetto scia, già ricomprese nella Prod. Netta di cui sopra, e nemmeno quelle per la diminuzione della densità dell'aria, già considerate nella curva di potenza impiegata, esse possono schematicamente essere così valutate:

- **Perdite elettriche trasmissione = 2%**
- **Perdite elettriche trasformazione (TRS di macchina) = 1%**
- **Perdite per indisponibilità alla produzione (guasti/assenza rete, guasti aerogeneratore, manutenzioni ordinarie/straordinarie, ecc) = 3%**

Assumendo che le perdite agiscono in modo combinato sul valore di produzione, complessivamente deve essere considerata una perdita complessiva del 5.9%.



IMPIANTO 50.4 MW	Quota media base sostegno	Altezza mozzo	Vm (altezza del mozzo)	Perdite di Impianto	Produzione media annua <u>netta</u> attesa (P50%)	
	m (slm)	m (sls)	m/s	%	GWh	Ore eq. (GWh/GW)
<b>Castellana Sicula</b>	728	135	6.03	-5.9	109.209	2229

## 15. ANALISI DI CONFIDENZA

Ciascuno dei processi messi in atto in questo studio per la valutazione di producibilità dell'impianto di Castellana Sicula è affetto da incertezze che possono, nei limiti del possibile, essere quantificate almeno a livello di stime. Ciò consente di approssimare i risultati con atteggiamento statistico per considerarli in termini probabilistici, cioè, in altre parole, si potrà considerare valido il risultato ottenuto con data probabilità.

L'analisi di confidenza dei processi applicati per giungere al risultato appare quindi di interesse quando si intende abbinarlo con dovuta certezza ad una data probabilità, ad esempio per determinare la produzione attesa con il 75% o il 90% di probabilità di essere raggiunta (o superata) annualmente mediamente in 10 anni di funzionamento dell'impianto.

Con il termine incertezza di un parametro si intende lo scarto quadratico medio della distribuzione statistica dell'errore di stima di quel parametro, ipotizzandolo casuale. La tabella sottostante riporta i fattori di incertezza considerati, assegnando a ciascuno di essi lo scarto S della loro distribuzione. Tali fattori di incertezza, comunemente utilizzati nel processo di valutazione della producibilità di un sito eolico, vengono adattati, incrementando o diminuendo il valore a seconda del grado di aggiustamento e di verifica dei risultati riscontrati nelle diverse fasi del processo, sia in fase di trattamento dei dati, sia di elaborazione dei risultati.

Fattori di incertezza	VESTAS V172 da 7.0 MW		
	Scarto $S$	Fattore di sensitività	Scarto della produzione media annua su 10 anni di funzionamento
	(%)	$Z$	
Accuratezza della misura del vento	3.00%	1.89	<b>5.68%</b>
Accuratezza della storicizzazione del dato anemometrico	2.00%	1.89	<b>3.79%</b>
Variabilità della media annuale (su un periodo di 10 anni)	4.00%	1.89	<b>2.39%</b>
Estrapolazione velocità all'altezza mozzo	3.00%	1.89	<b>5.68%</b>
Accuratezza modello di calcolo (WAsP)	4.00%	1.00	<b>4.00%</b>
Curva di potenza	2.00%	1.00	<b>2.00%</b>
Perdite elettriche	30.00%	0.03	<b>0.90%</b>
Indisponibilità alla produzione	30.00%	0.03	<b>0.90%</b>
	<b>Incertezza totale</b>		<b>10.31%</b>

In particolare:

- l'incertezza sulle **misure del vento** non può essere considerata inferiore al 3%, quale valore tipico per stazioni di misura di tipo ordinario. L'errore è da attribuire a quello proprio degli anemometri e all'influenza della struttura del sostegno sulla misura.
- di valore basso può essere stimata l'incertezza sulla **storicizzazione dei dati disponibili** (2%) in quanto la correlazione con i dati storici impiegati ha dato buoni risultati.
- la **variabilità della media annua** della velocità del vento, rilevato dalla serie di dati storici disponibili, ha un valore piuttosto contenuto (4%), e comunque incide relativamente poco nell'incertezza complessiva per una valutazione su un periodo di 10 anni.
- nel caso specifico, un elemento con un certo grado di incertezza riguarda l'**estrapolazione della ventosità all'altezza del mozzo** (3%), disponendo di una misura di ventosità distante da quella che interessa il mozzo della turbina in progetto.
- l'accuratezza del **funzionamento del modello di simulazione del vento**, verificata mediante confronti tra i dati misurati dalla stazione e quelli stimati da WAsP sulla sua verticale nonché sulla rappresentatività della distribuzione di Weibull, risulta discreta. Inoltre, lo studio di micrositing ha consentito di verificare come il modello tenda a

sottostimare la ventosità rispetto ai risultati ottenuti con altre serie di dati di stazioni più prossime al sito. Si ritiene di assegnare comunque un valore di incertezza del 4%.

- la percentuale di incertezza del parametro legato alla **curva di potenza** è di entità medio-bassa (2%), grazie alla disponibilità di informazioni fornite direttamente dal Costruttore della turbina e alla sua notoria affidabilità in termini di accuratezza delle prove in campo.
- l'incertezza sulla **stima delle perdite di impianto (30%)**, anche se poco influente (poiché incide relativamente poco sul risultato finale per il basso valore del fattore di sensibilità), sono piuttosto ampie in ragione della mancanza in questa fase di dati accurati sulle perdite elettriche e del contratto di manutenzione dell'impianto con percentuale di produzione garantita.
- il fattore di conversione  $Z$  converte l'incertezza sulle stime della velocità in incertezza di producibilità (scarto quadratico medio della distribuzione statistica dell'errore di stima della producibilità). In particolare il fattore di conversione  $Z$  (per le grandezze che influiscono sulla producibilità) dipende dalla curva di potenza della macchina e dalle caratteristiche della distribuzione del vento ed è stato quindi determinato con specifici calcoli per il tipo di macchina considerata.

### 15.1 Produzione attesa con data probabilità

Con l'incertezza totale ottenuta, semplici considerazioni di statistica consentono di determinare, a partire dalla produzione media P50% calcolata al capitolo precedente, i valori di P75%(10) e P90%(10), vale a dire la producibilità annua media che presenta rispettivamente una probabilità del 75% e del 90% di essere superata nel corso di dieci anni di produzione.

IMPIANTO	P <sub>50%</sub>		P <sub>75%(10)</sub>		P <sub>90%(10)</sub>	
	GWh/anno	Ore eq. (GWh/GW)	GWh/anno	Ore eq. (GWh/GW)	GWh/anno	Ore eq. (GWh/GW)
<b>49 MW</b>						
<b>Castellana Sicula</b>	<b>109.209</b>	<b>2229</b>	<b>101.618</b>	<b>2074</b>	<b>94.785</b>	<b>1934</b>

## 16. CONCLUSIONI

Nell'ambito dei processi di valutazione della producibilità di un impianto eolico, e più in generale nelle fasi decisionali dello sviluppo di un sito, è necessario conoscere con una buona affidabilità la consistenza della risorsa eolica disponibile. Ciò è garantito da idonee rilevazioni delle grandezze di velocità e di direzione del vento per un periodo di alcuni anni.

In questo studio sono stati analizzati ed elaborati i dati disponibili (dal Luglio 2008 al Novembre 2011) per i sensori a 40 m e 30 m della stazione anemometrica denominata DID14, installata nei pressi del sito di "Castellana Sicula" dove è in progettazione l'impianto eolico omonimo, ed è stata stimata la ventosità attesa nel lungo periodo mediante confronti con dati di una stazione anemometrica storica rappresentativa dell'area in esame.

La metodologia utilizzata assicura il mantenimento del controllo dei processi di elaborazione dati e di storicizzazione degli stessi.

La valutazione della produzione attesa è stata effettuata mediante idoneo modello di simulazione del vento applicato sul sito eolico dell'impianto, per il layout di progetto e con l'impiego della turbina VESTAS V172 – 7.0 MW.

Sul corretto funzionamento del modello sono state svolte le verifiche di rappresentatività della distribuzione di Weibull, del gradiente al suolo e di micrositing, che hanno dato esito positivo.

I processi messi in atto per ottenere i risultati di produzione, lorda e al netto delle tipiche perdite di impianto, sono stati criticamente analizzati (analisi di confidenza) per definire, in relazione ad una specifica probabilità, il valore di produzione media annua attesa.

L'entità della risorsa eolica del sito considerato appare adeguata ed interessante per la realizzazione di un impianto eolico costituito da macchine di grande taglia, in particolare da quelle a rotore esteso con buona altezza di mozzo, come quelle prese in esame per l'impianto eolico di "Castellana Sicula".