

TITOLARE DEL DOCUMENTO:

AREN ELECTRIC POWER SPA

Sede legale e amministrativa: Via Dell'Arrigoni, 308 – 47522 – Cesena (FC)
Codice Fiscale e P. IVA 03803880404

COMUNI DI CALITRI E BISACCIA (AV)
LOCALITA' "PIANI SAN PIETRO"

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI **IMPIANTO EOLICO** **"PIANI SAN PIETRO"**

REDAZIONE / PROGETTISTA:



AREN Electric Power S.p.A.
Società per Azioni con Unico Socio
Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC)
Ph. +39 0547 415245 - Fax +39 0547 415274
Web: www.aren-ep.com

TIMBRO E FIRMA PROGETTISTA:

Ing. Samuele Ulivi Ordine degli
Ingegneri di Forlì-Cesena – matr.
2866

TITOLO ELABORATO:

STUDIO DI PRODUCIBILITA'

CODICE ELABORATO:

CLTDG_GENR00200_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	08/06/2022	A.Lazar	E.Teodorani	S.Ulivi
01					
02					
03					
04					

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 2 di 11

Sommario

1.	Premessa.....	3
2	Dati di ventosità	4
3	Curva di distribuzione delle probabilità a 100 metri dal suolo.....	6
4	Dati tecnici degli aerogeneratori	7
4.1	Caratteristiche generali	7
4.2	Potenza in relazione alla densità dell'aria	8
4.3	Curva delle potenze	8
5	Producibilità dell'impianto.....	9
5.1	Stima annua.....	9
5.2	Probabilità di eccedenza dei valori di producibilità	10

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 3 di 11

1. Premessa

La presente Relazione si riferisce al Progetto Definitivo di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato “Calitri”, e sito nei Comuni di Calitri e Bisaccia (AV) (nel seguito: il **“Progetto”**).

Il Progetto sarà composto da n. 16 aerogeneratori modello Vestas V150 diametro 150 m (altezza hub 105 m) localizzati nei comuni di Calitri e Bisaccia. Gli aerogeneratori hanno una potenza nominale di 6.0 MW, per una potenza complessiva dell’impianto di 96.0 MW.

La società proponente è Aren Electric Power spa, con sede in Via dell’Arrigoni 308 – 47522 Cesena (FC), P.IVA 03803880404 (nel seguito: il **“Soggetto proponente”**).

L’impianto sarà allacciato alla Stazione Elettrica Terna del Comune di Bisaccia tramite connessione a 36 kV.

Scopo del presente documento è effettuare una stima dell’energia producibile annualmente da parte dell’impianto, in ragione delle caratteristiche tecniche degli aerogeneratori, dei dati di ventosità assunti e dell’approccio metodologico descritto nel seguito.

Nella seguente

WTG	X	Y
G1	534771	4534651
G2	534263	4533415
G3	533976	4534170
G4	533112	4533649
G5	533685	4533575
G6	533900	4535660
G7	534528	4535636
G8	535504	4535735
G9	533731	4536246
G10	533474	4536904
G11	531873	4529639
G12	534824	4533686
G13	534722	4532896
G14	532366	4529198
G15	533032	4529099
G16	533120	4529714

Tabella 1 si elencano le posizioni degli aerogeneratori che costituiscono il Progetto, espresse in coordinate WGS 84, fuso UTM 33:

WTG	X	Y
G1	534771	4534651
G2	534263	4533415
G3	533976	4534170
G4	533112	4533649
G5	533685	4533575
G6	533900	4535660
G7	534528	4535636
G8	535504	4535735
G9	533731	4536246
G10	533474	4536904

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 4 di 11

WTG	X	Y
G11	531873	4529639
G12	534824	4533686
G13	534722	4532896
G14	532366	4529198
G15	533032	4529099
G16	533120	4529714

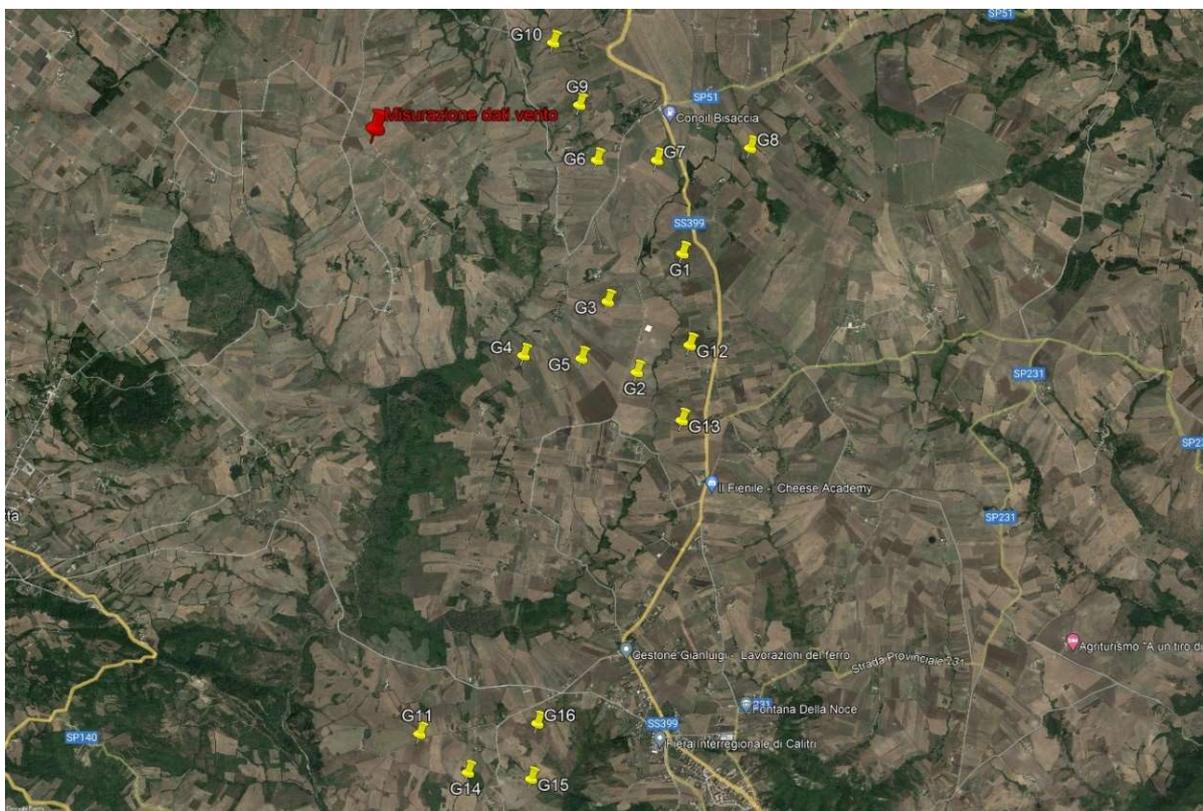
Tabella 1: Posizione aerogeneratori (WGS 84 UTM 33)

2 Dati di ventosità

I dati di ventosità considerati nel presente documento sono stati ricavati dai risultati di uno studio anemologico, redatto per stimare la producibilità di un altro impianto eolico, realizzato nei Comuni di Andretta e Bisaccia (AV): "Valutazione risorsa eolica e analisi producibilità" (ERG Wind 4, 2019) (nel seguito "Studio").

In particolare, i dati provengono dalla validazione di un set di misure, risultato di una serie di misurazioni anemometriche condotte da gennaio 2008 fino a novembre 2013. Il sito di misura (denominato BI07-50 nello Studio) comprendeva uno strumento montato a 50 m s.l.s. (all'altezza degli aerogeneratori già presenti) ed era collocato in contrada Pedurza, nel comune di Bisaccia (AV). Era situato a una distanza di circa 2 km dai più vicini aerogeneratori del Progetto Piani San Pietro (G10, G9 e G6) e una distanza di circa 6 km dai più lontani (G14, G15).

Nella seguente immagine (**Figura 1**) vi sono rappresentate le torri e il sito di misura dei dati del vento. Le coordinate indicative della stazione di rilevamento (WGS84 UTM 33) sono: 531597E, 4535978N.



AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 5 di 11

Figura 1 – Localizzazione aerogeneratori Progetto e sito di misurazione dei dati del vento (“Misurazione dati vento”)

Successivamente, come illustrato nel documento citato, si sono impiegati i dati raccolti dalla stazione di misura anemometrica per stabilire la producibilità annua dell’impianto eolico Piani San Pietro.

Dai dati disponibili si sono presi i parametri di Weibull, parametri che vengono usati per approssimare la curva di distribuzione della velocità del vento. In questo modo, essendo in conoscenza anche dei dati degli aerogeneratori scelti, si è in grado di calcolare la produzione annua.

Dai dati, per l’area di interesse, il valore medio della velocità del vento è di 5.50 m/s, valore di riferimento per il periodo 2008-2013 e associato all’insieme delle direzioni di provenienza del vento.

A seguito della campagna anemometrica, i cui dati sono stati utilizzati per il sito in esame, si è ricavata la distribuzione di tipo Weibull, che restituisce le probabilità di superamento di un determinato valore da parte della velocità del vento.

La formula che restituisce la probabilità cumulata in funzione del valore assoluto della velocità è caratterizzata da due parametri k (parametro di forma) e A (parametro di scala), ed è la seguente:

$$F(V) = 1 - e^{-(V/A)^k}$$

È stato in seguito determinato il parametro che determina la correlazione fra velocità del vento e altezza di misurazione (“wind shear”), in modo tale da poter ricavare, mediante modellazione, la velocità media del vento all’altezza corrispondente all’hub del modello di aerogeneratore prescelto.

La formula impiegata è stata la seguente:

$$\alpha = \frac{\ln(V_{z_1}) / \ln(V_{z_2})}{\ln(Z_1) / \ln(Z_2)}$$

Si sono così ottenuti dati sulla velocità del vento per un’altezza di 100 metri.

La velocità media è aumentata da 5.50 m/s a 6.16 m/s. Questo dato è stato impiegato per determinare la producibilità attesa dell’impianto Piani San Pietro.

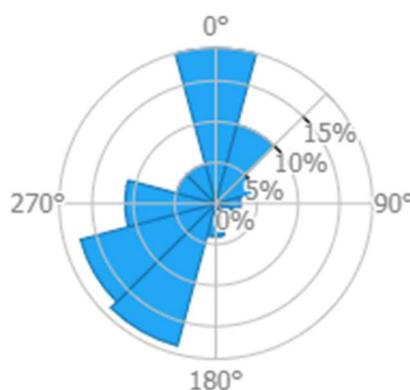


Figura 2 – Distribuzione media del vento nell’area del Progetto

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 6 di 11

Nel presente documento, per determinare la producibilità attesa dell'impianto "Piani San Pietro", per motivi di prossimità geografica, si assumono i dati di ventosità del sito sopra specificato per tutti gli aerogeneratori di Progetto.

3 Curva di distribuzione delle probabilità a 100 metri dal suolo

Si ritiene che i dati di vento a disposizione siano sufficientemente precisi, coerenti e continui, da non dover effettuare ulteriori approfondimenti.

Il valore della velocità media ottenuto è quindi di **6,16 m/s**. I parametri di Weibull ottenuti in seguito ai vari passaggi sono quindi:

- Velocità media $V_m = 6.16 \text{ m/s}$
- Parametro di forma (Weibull) $k = 1.63$
- Parametro di scala (Weibull) $A = 6.9 \text{ m/s}$

Nella seguente **Tabella 2** si riportano i risultati della modellazione della curva cumulativa, e del valore specifico di probabilità di ogni valore di velocità, per il sito in questione:

V (m/s)	Probabilità cumulativa (%)	Probabilità (%)
0,5	1,15%	1,15%
1,5	7,20%	6,05%
2,5	16,31%	9,11%
3,5	27,05%	10,74%
4,5	38,34%	11,29%
5,5	49,34%	11,00%
6,5	59,48%	10,14%
7,5	68,41%	8,93%
8,5	75,96%	7,55%
9,5	82,13%	6,17%
10,5	87,02%	4,89%
11,5	90,77%	3,76%
12,5	93,58%	2,81%
13,5	95,63%	2,05%
14,5	97,08%	1,45%
15,5	98,09%	1,01%
16,5	98,78%	0,68%
17,5	99,23%	0,45%
18,5	99,52%	0,29%
19,5	99,71%	0,19%
20,5	99,83%	0,12%
21,5	99,90%	0,07%
22,5	99,94%	0,04%
23,5	99,97%	0,03%
24,5	99,98%	0,01%
25,5	99,99%	0,01%
26,5	99,99%	0,00%
27,5	100,00%	0,00%

Tabella 2: Probabilità e probabilità cumulata di velocità del vento.

Di seguito il grafico ricavato dalle probabilità calcolate:

AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale: Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC), Italia

Ph. +39 0547 415245 - email: areaenergia@legalmail.it

Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di Forlì - Cesena Part. Iva 03803880404



AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 7 di 11

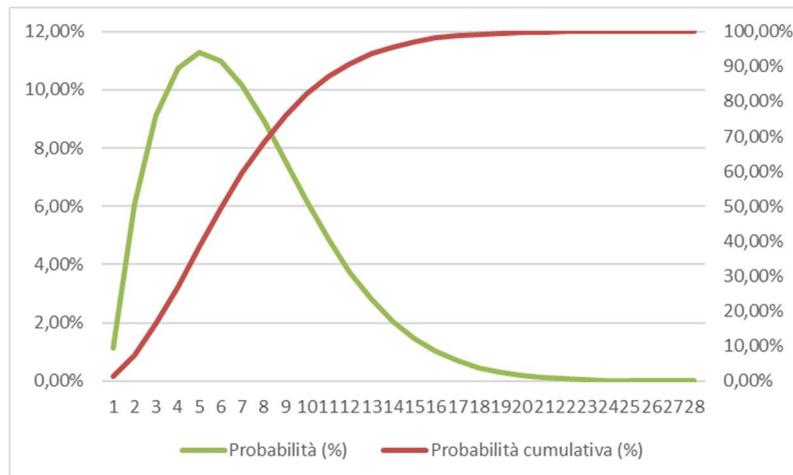


Figura 3 – Curva di distribuzione delle probabilità

In verde sono rappresentati i valori della probabilità per ciascun valore della velocità dei venti, in rosso la probabilità cumulativa della velocità dei venti.

4 Dati tecnici degli aerogeneratori

4.1 Caratteristiche generali

Nella seguente figura è rappresentata la navicella del modello di aerogeneratore previsto. In **Tabella 3** sono sintetizzate le principali caratteristiche tecniche e dimensionali.



Figura 4 – Rappresentazione della navicella

Modello	VESTAS V150
Potenza	6 MW
Diametro rotore	150 m
Altezza mozzo	105 m
Regolazione potenza	Controllo di frequenza e di coppia a velocità variabile
Caratteristiche torre	Torre conica tubolare in acciaio

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 8 di 11

Area spazzata	17.672 m ²
Numero pale	3
Lunghezza pale	73.65 m
Materiale pale	Fibra di vetro epossidica rinforzata (GRE), plastica fibrorinforzata al carbonio (CRP)
Tensione generatore	720 V
Tipo generatore	Generatore sincro a magneti permanenti
Frequenza generatore	50/60 Hz

Tabella 3: Caratteristiche principali degli aerogeneratori

4.2 Potenza in relazione alla densità dell'aria

La potenza specifica contenuta nel vento, intesa come potenza meccanica attraverso l'unità di superficie, è funzione del cubo del valore della velocità ma anche della densità dell'aria, secondo la formula seguente:

$$P_V = \frac{1}{2} \rho V^3$$

L'aerogeneratore sarà caratterizzato da una curva di funzionamento, che associa ad ogni valore di velocità del vento nel campo nominale di funzionamento della macchina, il relativo valore di potenza elettrica in uscita, in funzione della densità dell'aria. Per ogni valore di velocità, il ragguaglio viene effettuato mediante le formule seguenti.

Si determina un valore della velocità V^I , che rappresenta il valore corretto della velocità specifica per la quale si vuole determinare la potenza erogata, per valori di densità ρ^I diversi da quello nominale ρ .

$$V^I = \frac{V}{\left(\frac{\rho}{\rho^I}\right)^{1/3}}$$

Successivamente, si determina il valore della potenza elettrica erogata mediante la formula seguente:

$$P = P_N + (P_N - P_{N+1}) \frac{(V_N - V_N^I)}{(V_{N+1}^I - V_N^I)}$$

Dove N e N+1 identificano i valori di potenza e di velocità del vento considerati per ogni intervallo e per quello immediatamente successivo, con l'apice I che rappresenta i valori ragguagliati in funzione della densità dell'aria (a partire dal valore di densità di riferimento per il modello di aerogeneratore prescelto).

4.3 Curva delle potenze

La seguente **Tabella 4** rappresenta:

- Nella seconda colonna, la curva di potenza dell'aerogeneratore in condizioni nominali, cioè con la densità dell'aria assunta pari al valore di riferimento 1.225 kg/m³;
- Nelle colonne dalla terza alla quinta, i valori della potenza ragguagliata a differenti valori di densità dell'aria, secondo le formule indicate nel paragrafo precedente.

Si noti come la produzione sia nulla per valori di velocità superiori a 25 m/s, che è la velocità di cut-off del modello.

Velocità del vento [m/s]	Potenza nominale aerogeneratore [kW]	Potenza effettiva [kW]		
		Densità aria: 1.15 kg/m ³	Densità aria: 1.20 kg/m ³	Densità aria: 1.25 kg/m ³
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 9 di 11

2	0	0	0	0
3	40	38	39	41
4	250	235	245	255
5	563	529	552	574
6	1032	969	1011	1053
7	1693	1589	1658	1728
8	2565	2408	2513	2617
9	3657	3433	3582	3732
10	4777	4485	4680	4874
11	5642	5297	5527	5757
12	5956	5591	5834	6000
13	5998	5631	5876	6000
14	6000	5633	5878	6000
15	6000	5633	5878	6000
16	6000	5633	5878	6000
17	5842	5484	5723	5961
18	5353	5025	5244	5462
19	4887	4588	4787	4987
20	4424	4153	4334	4514
21	3966	3723	3885	4047
22	3495	3281	3424	3566
23	3012	2828	2951	3073
24	2580	2422	2527	2633
25	2044	1919	2002	2086

Tabella 4: Potenza elettrica "Vestas V150 6 MW" in relazione alla densità dell'aria

5 Producibilità dell'impianto

5.1 Stima annua

La producibilità dell'impianto viene determinata moltiplicando la potenza erogata dalla macchina per ciascun valore di velocità per il numero di ore annue in cui è presente tale valore, in base all'analisi statistica, ricavabile come probabilità del valore stesso sul totale delle ore annue.

$$E = P [kW] \times (Probabilità) \times 8760 [h] \rightarrow [MWh]$$

I valori di probabilità che si considerano sono quelli desumibili dalla **Tabella 2**.

La somma dei valori così ricavati per tutti i valori di velocità del campo di funzionamento costituirà la produzione annua massima teorica di un singolo aerogeneratore, considerato un fattore di disponibilità dell'aerogeneratore stesso pari al 100%. Nella realtà, tale valore dovrà essere ridotto, per tenere conto dell'effetto di numerosi fattori (ambientali e climatici, guasti, manutenzioni, problemi di rete, mancato ritiro, ecc.).

Nella seguente **Tabella 5** si riepiloga pertanto la produzione attesa del complesso di aerogeneratori. Si applicano diverse ipotesi di valore per il fattore di disponibilità globale, considerato come il rapporto dei singoli fattori relativi a diverse cause di indisponibilità, e per differenti valori di densità dell'aria.

Fattore annuo di disponibilità [%]	Produzione annua n.16 aerogeneratori [MWh]		
	Densità aria: 1.15 kg/m ³	Densità aria: 1.20 kg/m ³	Densità aria: 1.25 kg/m ³
96.5	228760	234740	240539
96.0	227580	233520	239292
95.5	226390	232310	238046
95.0	225210	231090	236800
94.5	224020	229880	235553

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 10 di 11

Fattore annuo di disponibilità [%]	Produzione annua n.16 aerogeneratori [MWh]		
	Densità aria: 1.15 kg/m ³	Densità aria: 1.20 kg/m ³	Densità aria: 1.25 kg/m ³
94.0	222840	228660	234307

Tabella 5: Stima producibilità annua impianto "Piani San Pietro"

Per una potenza nominale pari a $16 \times 6 \text{ MW} = 96 \text{ MW}$, le ore equivalenti di funzionamento complessive dell'impianto, per le varie ipotesi, sono:

Fattore annuo di disponibilità [%]	Ore equivalenti di funzionamento [h/anno]		
	Densità aria: 1.15 kg/m ³	Densità aria: 1.20 kg/m ³	Densità aria: 1.25 kg/m ³
96.5	2383	2445	2506
96.0	2371	2433	2493
95.5	2358	2420	2480
95.0	2346	2407	2467
94.5	2334	2395	2454
94.0	2321	2382	2441

Tabella 6: Ore equivalenti di funzionamento

5.2 Probabilità di eccedenza dei valori di producibilità

A partire dalla producibilità media dell'impianto, calcolata nel paragrafo precedente, si introducono i parametri di incertezza, che devono essere applicati ai vari fattori che determinano la producibilità stessa, nelle varie fasi della modellazione.

La producibilità media sopra calcolata è considerata il valore più probabile della produzione annua (P50), pari al valore con il 50% di probabilità di superamento.

Tali incertezze si applicano alle varie grandezze che determinano l'esito della modellazione, nella forma di una distribuzione di probabilità dei valori delle distinte grandezze da stimare attorno al valore più probabile. Il risultato cumulativo si applica alla producibilità annua dell'impianto, per stabilire le probabilità di raggiungimento di determinati step di producibilità crescenti.

Nel caso in esame si assumono i seguenti parametri per l'analisi di incertezza:

- $\sigma_{ME} = 8\%$ Incertezza sull'assenza di misure dirette nel sito degli aerogeneratori
- $\sigma_L = 5\%$ Incertezza legata alla localizzazione degli aerogeneratori (applicazione di dati di ventosità uniformi per i 15 aerogeneratori)
- $\sigma_{TU} = 10\%$ Incertezza legata all'incidenza degli effetti turbolenti
- $\sigma_{WS} = 2\%$ Incertezza legata alla stima del wind shear
- $\sigma_{MO} = 5\%$ Incertezza legata alla modellazione dei dati di ventosità

La stima complessiva dell'incertezza sulla stima della producibilità annua è data da:

$$\sigma_{TOT} = \sqrt{\sigma_{ME}^2 + \sigma_L^2 + \sigma_{TU}^2 + \sigma_{WS}^2 + \sigma_{MO}^2}$$

Da cui $\sigma_{TOT} = 14.8\%$

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: CLTDG_GENR00200_00
		Data: 08/06/2022
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 11 di 11

Applicando tale incertezza complessiva, relativamente alla modellazione della produzione, si ottengono i valori di producibilità media attesa di cui alla **Tabella 7**. Tali valori sono riferiti ai 3 distinti casi relativi alle ipotesi sulla densità dell'aria, e considerando (ai fini cautelativi) un fattore di disponibilità pari al 94% delle ore annue.

Produzione media attesa	Probabilità di superamento	Energia [MWh/anno]		
		Densità aria: 1.15 kg/m ³	Densità aria: 1.20 kg/m ³	Densità aria: 1.25 kg/m ³
P50	50%	222840	228660	234307
P75	75%	197119	202267	207262
P90	90%	173989	178533	182942

Tabella 7: Produzione media attesa (fattore di disponibilità: 94%)