

TITOLARE DEL DOCUMENTO:

AREN Green S.r.l.

Società soggetta alla direzione e coordinamento di AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale e amministrativa: Via dell'Arrigoni n. 308 | 47522 Cesena (FC) | Ph. +39 0547 415245

Iscritta nel Registro delle Imprese della Romagna – Forlì-Cesena e Rimini | REA 326908 | C.F./P.Iva 04032170401

COMUNI DI FORENZA (PZ) E PALAZZO SAN GERVASIO (PZ)
LOCALITA' "TUFAROLI"

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI **IMPIANTO EOLICO** **"TUFAROLI"**

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 producibilità

CODICE ELABORATO:

TUFDG_GENR00200_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	09/11/2023	A. Lazar	E. Teodorani	S. Ulivi
01					
02					
03					
04					

Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 2 di 13

Sommario

1.	Premessa.....	3
2	Dati di ventosità	5
3	Curva di distribuzione delle probabilità a 90 metri dal suolo.....	7
4	Dati tecnici degli aerogeneratori	9
4.1	Caratteristiche generali	9
4.2	Potenza in relazione alla densità dell'aria	10
4.3	Curva delle potenze	10
5	Producibilità dell'impianto.....	11
5.1	Stima annua.....	11
5.2	Probabilità di eccedenza dei valori di producibilità	12

AREN Green S.r.l.

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

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

Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di Forlì – Cesena Part. Iva 04032170401



Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 3 di 13

1. Premessa

La presente Relazione si riferisce al Progetto Definitivo di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato "Tufaroli", e sito nei Comuni di Forenza(PZ) e Palazzo San Gervasio (PZ) (nel seguito: il "Progetto").

La società proponente è Aren Green S.r.l. Unipersonale, con sede in Via dell'Arrigoni 308 – 47522 Cesena (FC), P.IVA 04032170401 (nel seguito: il "Soggetto proponente").

Il Soggetto proponente ha intrapreso l'iniziativa imprenditoriale di realizzare un impianto di produzione di energia elettrica mediante lo sfruttamento del vento, composto da 10 aerogeneratori mod. Vestas V150, ciascuno della potenza di 6,0 MW, per una potenza di immissione complessiva dell'impianto eolico pari a 60,0 MW.

Il tracciato del cavidotto di collegamento alla Stazione utente attraversa i Comuni di Forenza e Palazzo San Gervasio (PZ).

L'impianto sarà allacciato alla Stazione Elettrica Terna di nuova realizzazione, denominata "Palazzo San Gervasio", 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 tabella si elencano le posizioni degli aerogeneratori che costituiscono il Progetto, espresse in coordinate WGS 84, fuso UTM 33:

WTG	X	Y
TU1	570500	4526780
TU2	570721	4525822
TU3	571341	4524997
TU4	571774	4525669
TU5	572448	4524903
TU6	573480	4525559
TU7	574158	4525765
TU8	574602	4526207
TU9	574529	4527132
TU10	575084	4527089

Tabella 1: Posizione aerogeneratori (WGS 84 UTM 33)

Aren Green Srl Impianto Eolico “Tufaroli”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 4 di 13

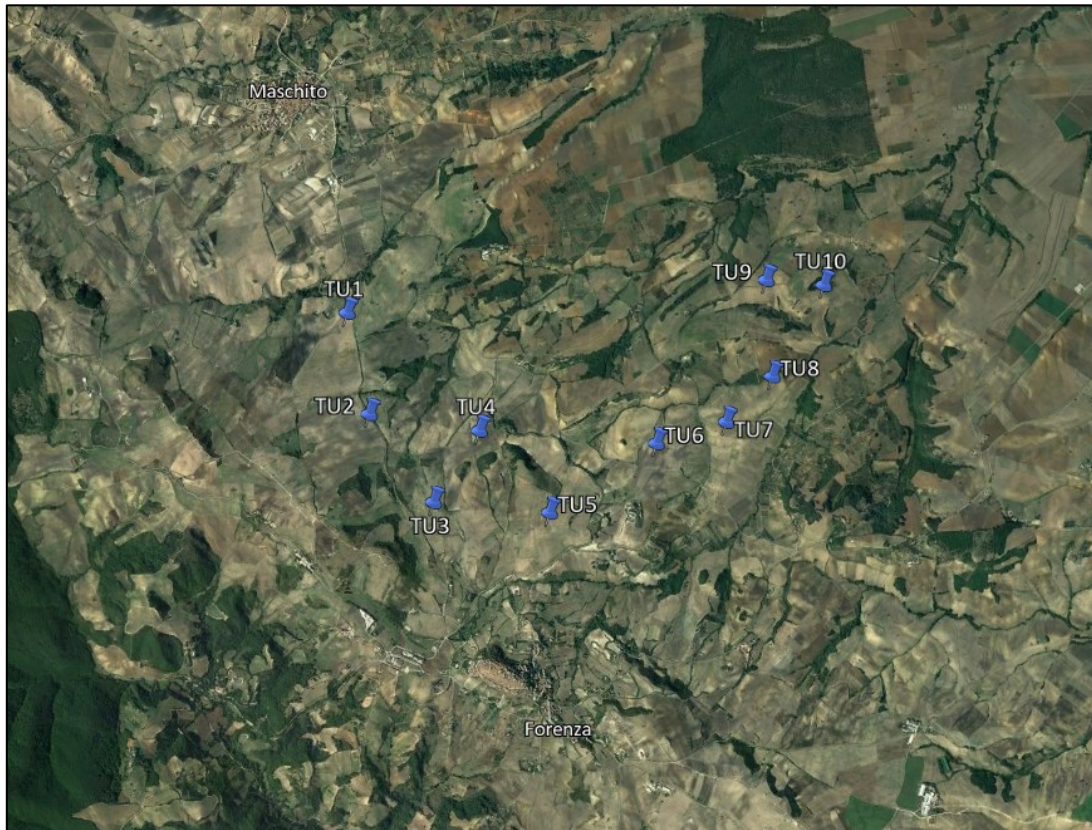


Figura 1 – Localizzazione aerogeneratori di progetto su immagine satellitare

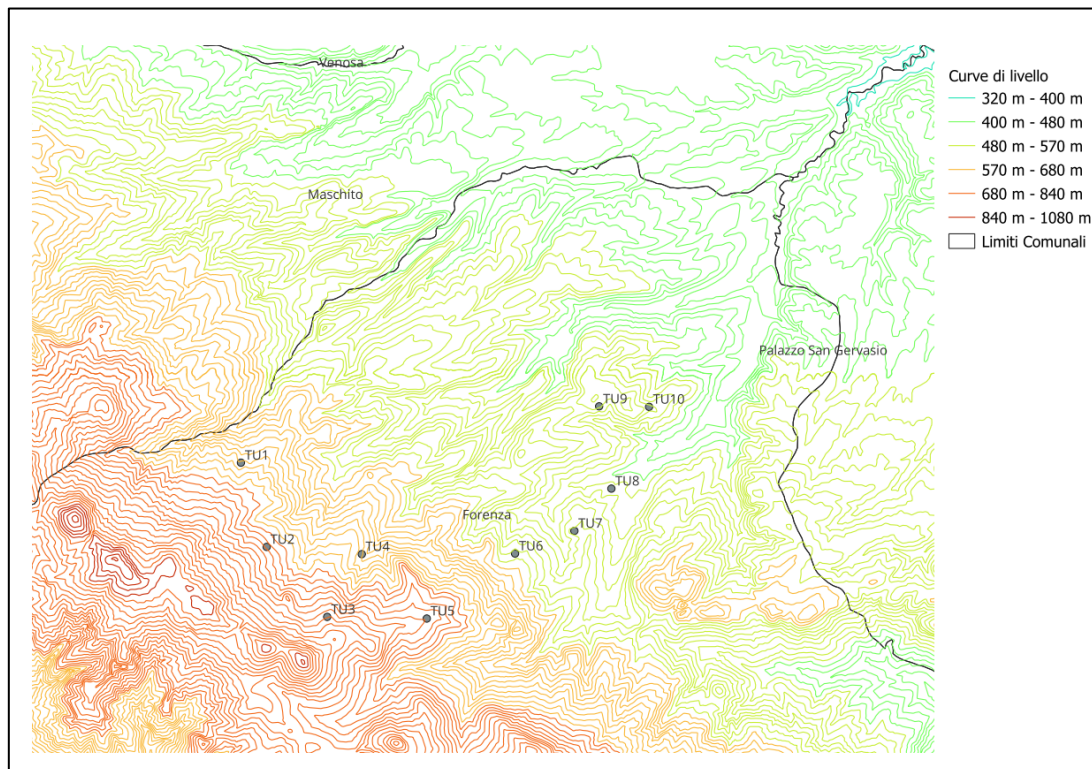


Figura 2 – Localizzazione aerogeneratori di progetto su DTM

AREN Green S.r.l.

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

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

Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di Forlì – Cesena Part. Iva 04032170401



Aren Green Srl Impianto Eolico “Tufaroli”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 5 di 13

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 Forenza e Maschito (PZ): “A.5 *Studio anemologico*” (Winderg S.r.l., 2019) (nel seguito “Studio”).

L’analisi della disponibilità del dato nel periodo di misura è di fondamentale importanza nella definizione degli intervalli di dati utilizzabili nella stima della risorsa eolica che ha un carattere stagionale con una densità di energia maggiore nei mesi primaverili e invernali rispetto ai mesi estivi ed autunnali. Per evitare di sovrastimare o sottostimare la risorsa eolica la base di dati di partenza deve avere un periodo di misura su base annuale, inteso come 12 mesi di misura consecutivi, in modo da eliminare l’effetto della stagionalità.

In particolare, i dati provengono dalla validazione di un set di misure, risultato di una serie di misurazioni anemometriche condotte per un periodo temporale di circa 1 anno (dal 01/05/2018 al 30/04/2019). Il sito di misura (denominato “**MM 95m**” nello Studio) comprendeva tre strumenti montati a 45 e 89,5 e 92,5 m s.l.s.) ed era collocato tra i comuni di Lavello e Venosa. Era situato a una distanza di circa 15 km dagli aerogeneratori del Progetto.

Nelle seguenti immagini 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: 566827 E 4541943 N.

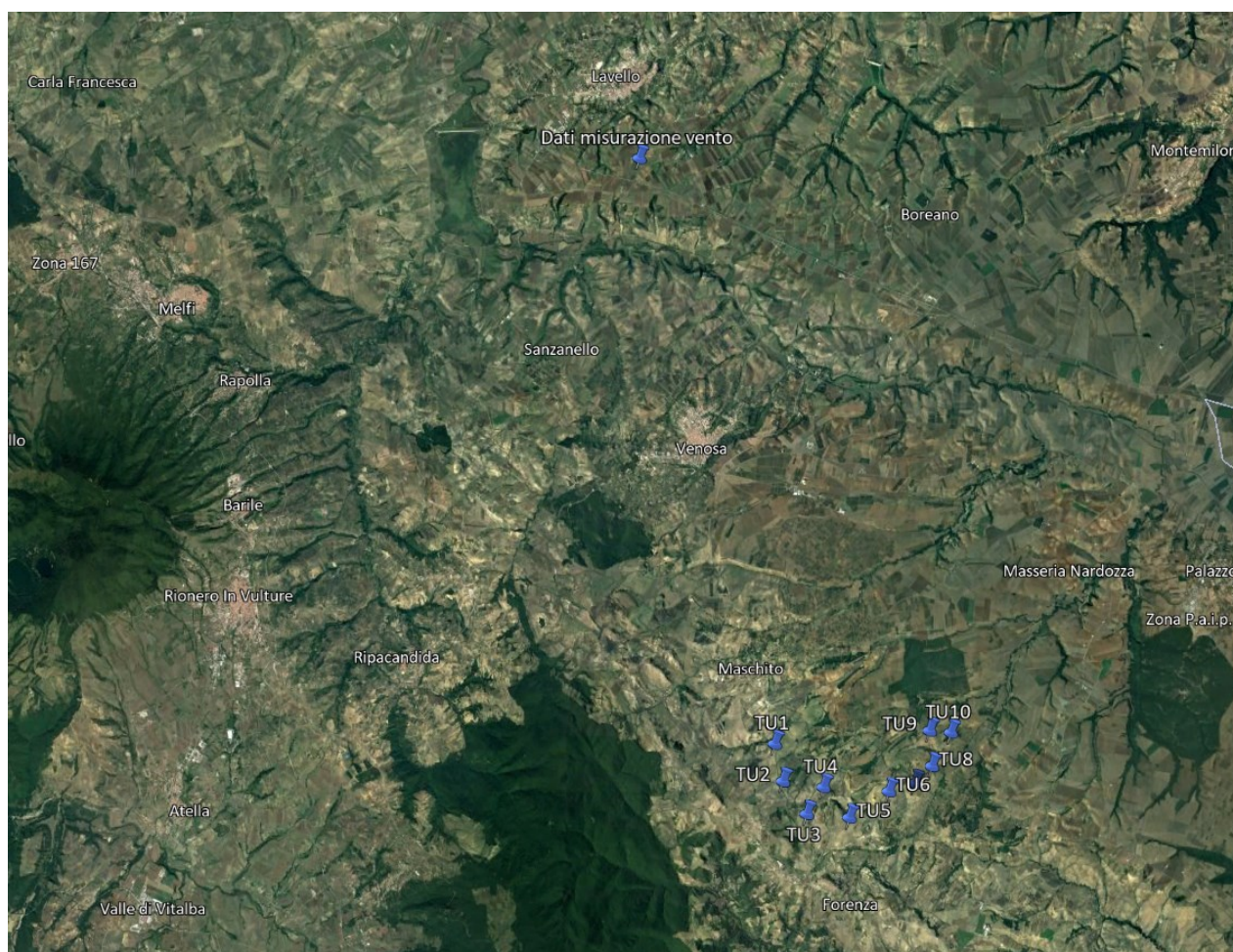


Figura 3 – Localizzazione aerogeneratori Progetto e sito di misurazione dei dati del vento (“**Dati vento**”)

Aren Green Srl Impianto Eolico “Tufaroli”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 6 di 13

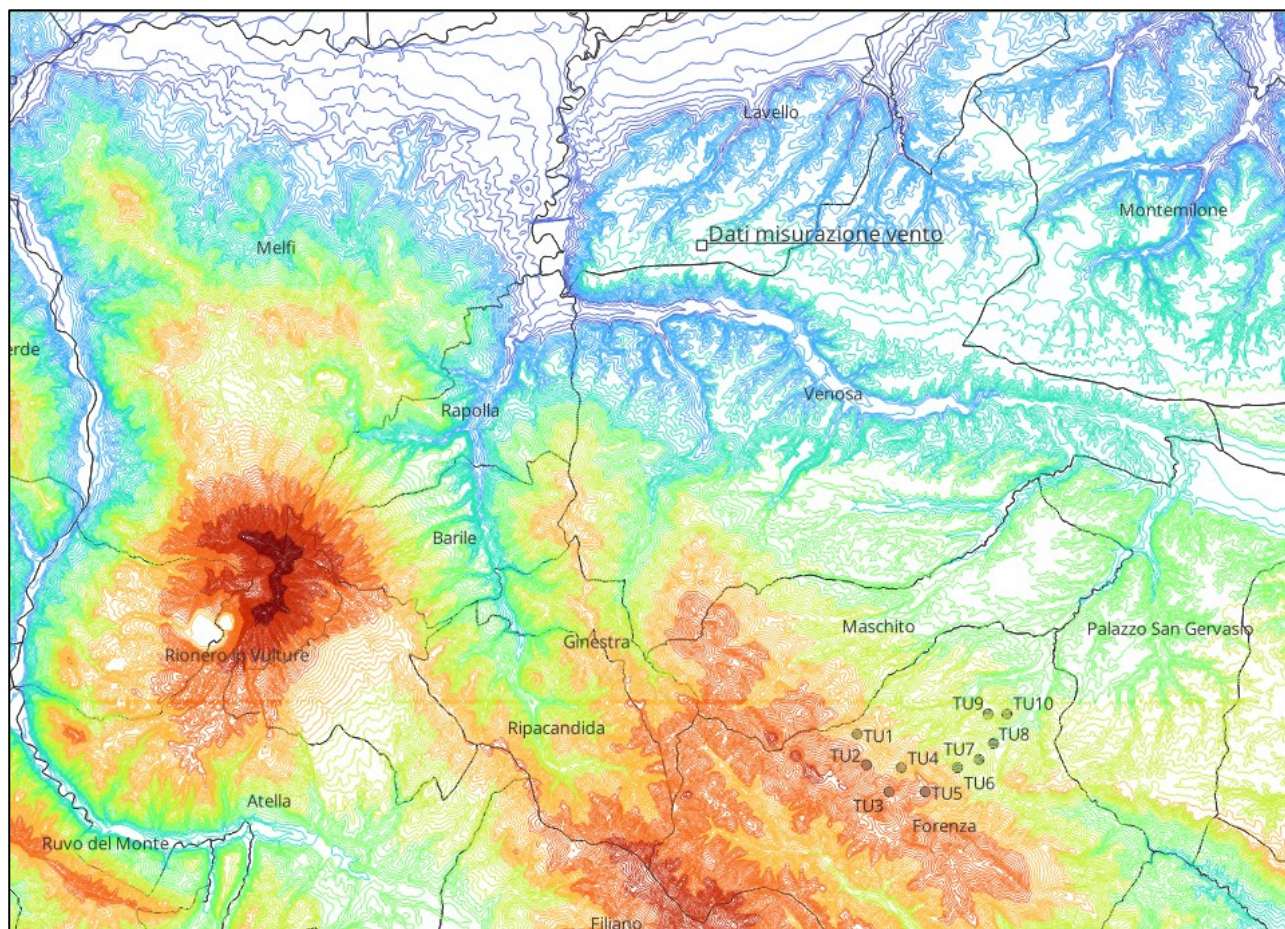


Figura 4 – Posizione della torre anemometrica rispetto all’impianto eolico di progetto su DTM

Come base del modello digitale del terreno sono state utilizzate le curve SRTM Dataset (Shuttle Radar Topography Mission) con passo in altezza di 10 m.

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 “**Tufaroli**”.

Vista la differenza di quota tra i dati del vento misurati (92,5 m s.l.s.) e l’altezza del mozzo delle torri eoliche (105 m s.l.s.), si sono resi necessari diversi passaggi per ottenere dati del vento da cui poter stimare la producibilità annua dell’impianto. La velocità media annua a 92,5 m s.l.s. così ottenuta è pari a 6,02 m/s. Oltre alla velocità media annua si è ricavata anche la curva di distribuzione della velocità del vento. Questa verrà usata, insieme alla curva di potenza degli aerogeneratori, per valutare la producibilità annua dell’impianto.

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:

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

Aren Green Srl Impianto Eolico “Tufaroli”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 7 di 13

Dopo aver estratto i dati grezzi provenienti dall’anemometro, si è impiegato un wind shear exponent calcolato a 0,18 e si è impiegata la seguente formula per ricavare i dati sulla velocità del vento all’altezza del mozzo delle torri:

$$V_{105\text{ m}} = \left(\frac{h_{\text{mozzo}}}{h_{\text{anemometro}}} \right)^{\alpha \times V_{40\text{ m}}}$$

Si sono così ottenuti dati sulla velocità del vento per un’altezza di 105 metri.

La velocità media annua è aumentata da **6,02 m/s** a **6,12 m/s**. Questo dato è stato impiegato per determinare la producibilità attesa dell’impianto Tufaroli.

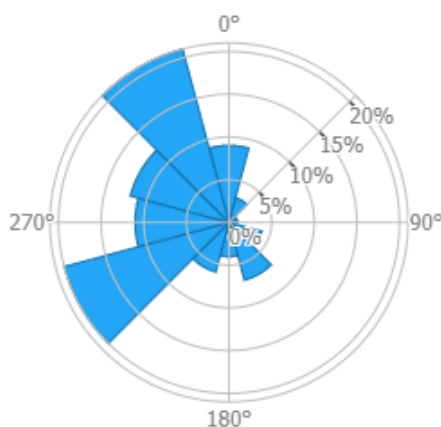


Figura 5 – Distribuzione media del vento nell’area del Progetto

Nel presente documento, per determinare la producibilità attesa dell’impianto “Tufaroli”, 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 105 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 **6,12 m/s**.

Nella seguente Tabella si riportano i risultati della modellazione della curva cumulativa e del valore specifico di probabilità di ogni valore di velocità:

Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 8 di 13

Velocità vento [m/s]	Probabilità	Probabilità cumulativa
0	0,00%	0,00%
1	2,59%	2,59%
2	6,64%	9,23%
3	9,55%	18,78%
4	11,30%	30,08%
5	11,93%	42,01%
6	11,61%	53,62%
7	10,59%	64,21%
8	9,12%	73,33%
9	7,47%	80,80%
10	5,84%	86,64%
11	4,37%	91,01%
12	3,14%	94,15%
13	2,17%	96,31%
14	1,44%	97,75%
15	0,92%	98,67%
16	0,57%	99,24%
17	0,34%	99,58%
18	0,19%	99,77%
19	0,11%	99,88%
20	0,06%	99,94%
21	0,03%	99,97%
22	0,02%	99,99%
23	0,01%	99,99%
24	0,00%	100,00%
25	0,00%	100,00%
26	0,00%	100,00%
27	0,00%	100,00%
28	0,00%	100,00%
29	0,00%	100,00%
30	0,00%	100,00%

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

Aren Green Srl Impianto Eolico “Tufaroli”	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 9 di 13

Di seguito il grafico ricavato dalle probabilità calcolate:

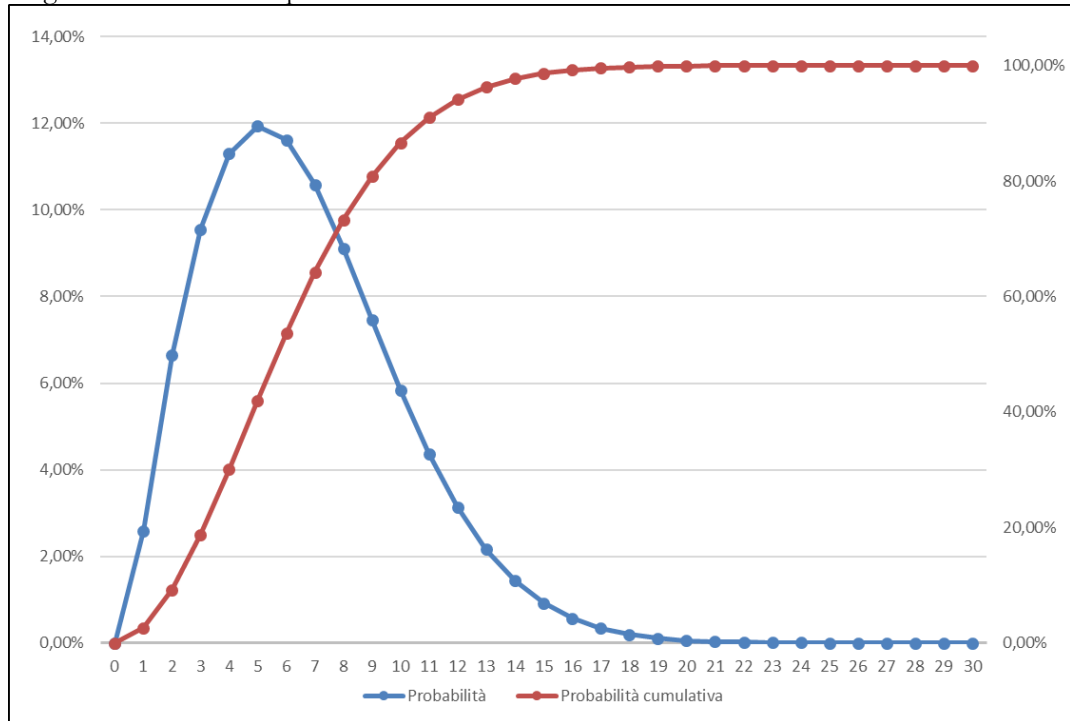


Figura 6 – Curva di distribuzione delle probabilità

In rosso sono rappresentati i valori della probabilità per ciascun valore della velocità dei venti, in blu 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 7 – Rappresentazione della navicella

Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 10 di 13

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
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 sincrono 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 ragguglio 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 .

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

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 raggugliati 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 raggugliata 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.

Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 11 di 13

Velocità vento [m/s]	Potenza nominale aerogeneratore [kW]	Potenza effettiva [kW]			
	Densità aria 1,225 kg/m ³ (Datasheet)	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	
2	0	0	0	1	
3	40	27	36	44	
4	250	224	241	258	
5	563	514	547	579	
6	1032	949	1005	1059	
7	1693	1566	1651	1734	
8	2565	2383	2505	2624	
9	3657	3447	3588	3725	
10	4777	4597	4718	4835	
11	5642	5570	5618	5665	
12	5956	5945	5953	5959	
13	5998	5997	5998	5998	
14	6000	6000	6000	6000	
15	6000	6000	6000	6000	
16	6000	6000	6000	5983	
17	5842	6000	5899	5786	
18	5353	5528	5410	5296	
19	4887	5070	4947	4828	
20	4424	4615	4487	4362	
21	3966	4172	4034	3899	
22	3495	3716	3568	3423	
23	3012	3219	3080	2945	
24	2580	2848	2668	2493	
25	2044	3109	2394	1699	
26	0	0	0	0	
27	0	0	0	0	
28	0	0	0	0	
29	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	

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.

$$E = P [kW] \times (Probabilità) \times 8766 [h] \rightarrow [MWh]$$

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%. La produzione annua ideale dell'impianto è pari a 169'992 MWh.

Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 12 di 13

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.14 aerogeneratori [MWh]		
	Densità aria 1,15 kg/m ³	Densità aria 1,2 kg/m ³	Densità aria 1,25 kg/m ³
96,5	159501	163936	168241
96,0	158675	163087	167369
95,5	157848	162238	166497
95,0	157022	161388	165626
94,5	156195	160539	164754
94,0	155369	159689	163882

Tabella 5: Stima producibilità annua impianto "Tufaroli"

Per una potenza nominale pari a $10 \times 6 \text{ MW} = 60 \text{ MW}$, 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 1,2 kg/m ³	Densità aria 1,25 kg/m ³
96,5	2658	2732	2804
96,0	2645	2718	2789
95,5	2631	2704	2775
95,0	2617	2690	2760
94,5	2603	2676	2746
94,0	2589	2661	2731

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.

Aren Green Srl Impianto Eolico "Tufaroli"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: TUFDG_GENR00200_00
		Data: 09/11/2023
	Studio di producibilità	Revisione: 00
		Pagina: 13 di 13

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 $\sigma_{TOT} = 14,8\%$

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	Energia [MWh/anno]		
	Densità aria 1,15 kg/m3	Densità aria 1,2 kg/m3	Densità aria 1,25 kg/m3
P10	189429	194697	199809
P25	173302	178122	182798
P50	155369	159689	163882
P75	137436	141257	144966
P90	121309	124682	127956
P99	93572	96174	98699

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