

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 BANZI, PALAZZO SAN GERVASIO (PZ)  
SPINAZZOLA (BT)  
LOCALITA' "PIANO MADAMA GIULIA"**

# **PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI IMPIANTO EOLICO "PIANO MADAMA GIULIA"**

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](http://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:

**PMGDG\_GENR00200\_00**

FORMATO:

**A4**

Nr. EL.:

**/**

FASE:

**PROGETTO  
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	08/02/2023	A.Lazar	E.Teodorani	S.Ulivi
01					
02					
03					
04					

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>2 di 11</b>

## Sommario

1.	Premessa.....	3
2.	Dati di ventosità .....	4
3.	Curva di distribuzione delle probabilità a 90 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 .....	11

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>3 di 11</b>

## 1. Premessa

La presente Relazione si riferisce al Progetto Definitivo di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica, denominato “**Piano Madama Giulia**”, e sito nei Comuni di Banzi, Palazzo San Gervasio e Spinazzola (nel seguito: il “**Progetto**”).

Il Soggetto proponente ha intrapreso l'iniziativa imprenditoriale di realizzare un impianto di produzione di energia elettrica mediante lo sfruttamento del vento, composto da n. 15 aerogeneratori mod. Siemens Gamesa SG 4.7 – 155, ciascuno della potenza di 4,7 MW, per una potenza di immissione complessiva dell'impianto eolico pari a 70,5 MW.

Gli aerogeneratori si trovano nei Comuni di Banzi (PZ), Palazzo San Gervasio (PZ) e Spinazzola (BT). Il tracciato del cavidotto di collegamento alla Stazione utente attraversa i medesimi Comuni. L'impianto sarà allacciato alla futura Stazione Elettrica Terna di Spinazzola, tramite connessione a 36 kV.

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

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
PG1	583868	4535302
PG2	584077	4533471
PG3	585590	4532214
PG4	585985	4532704
PG5	586459	4532239
PG6	587070	4531400
PG7	590433	4529860
PG8	591657	4530253
PG9	592429	4529691
PG10	592137	4528425
PG11	592655	4528042
PG12	593089	4528665
PG13	592563	4526385
PG14	593852	4529587
PG15	594992	4530206

**Tabella 1:** Posizione aerogeneratori (WGS 84 UTM 33)

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>4 di 11</b>

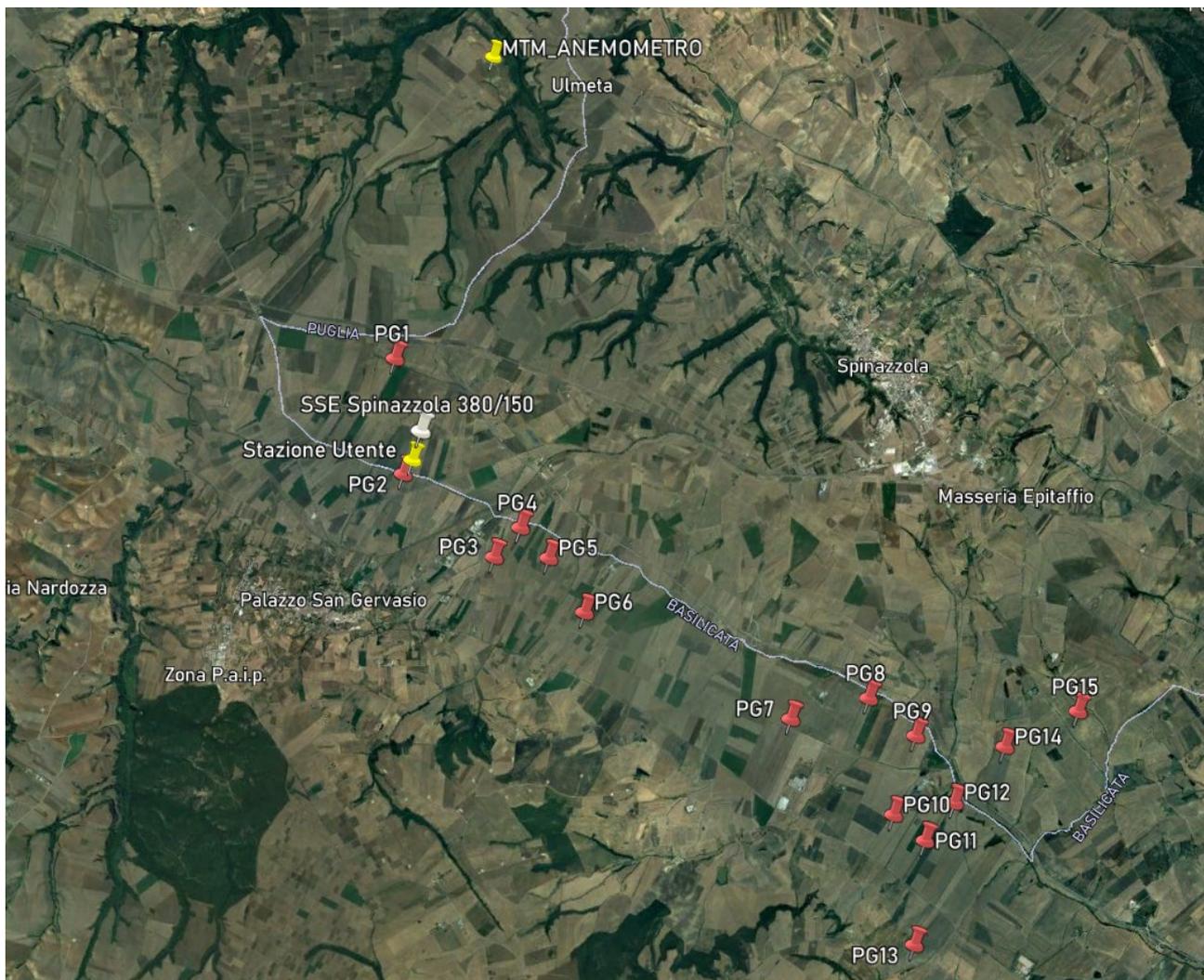
## 2 Dati di ventosità

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 nel Comune di Montemilone (PZ): “*DNV GL Garrad Hassan\_Report di valutazione*” (Crossenergy S.r.l., 2019) (nel seguito “Studio”).

In particolare, i dati provengono dalla validazione di un set di misure, risultato di una serie di misurazioni anemometriche condotte dal 11° febbraio 2011 fino al 26 giugno 2013. Il sito di misura (denominato **M1** nello Studio) comprendeva tre strumenti montati a 30, 40 e 50 m s.l.s.) ed era collocato tra i comuni di Montemilone e Spinazzola.

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 585175 E 4540245 N.



**Figura 1** – Localizzazione aerogeneratori Progetto e sito di misurazione dei dati del vento (“**MTM\_ANEMOMETRO**”)

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 “**Piano Madama Giulia**”.

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>5 di 11</b>

Essendo più completi rispetto agli altri, si è scelto di utilizzare i dati del vento provenienti dal sensore installato a 40 m s.l.s. Vista la differenza di quota tra i dati del vento misurati e l'altezza del mozzo delle torri eoliche (90 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 40 m s.l.s. così ottenuta è pari a 5,04 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:

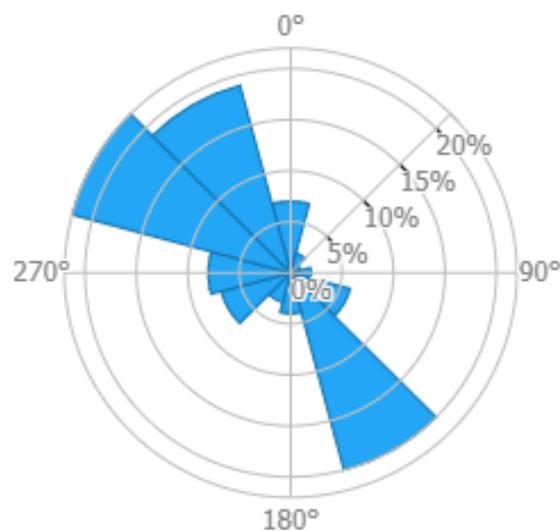
$$\alpha = \frac{\ln(V_{Z_1}) / \ln(V_{Z_2})}{\ln(Z_1) / \ln(Z_2)}$$

Dopo aver estratto i dati grezzi provenienti dall'anemometro, si è impiegato un wind shear exponent stimato a 0,23 e si è impiegata la seguente formula per ricavare i dati sulla velocità del vento all'altezza del mozzo delle torri:

$$V_{90m} = \left( \frac{h_{mozzo}}{h_{anemometro}} \right)^{\alpha \times V_{40m}}$$

Si sono così ottenuti dati sulla velocità del vento per un'altezza di 90 metri.

La velocità media annua è aumentata da **5,04 m/s** a **6,07 m/s**. Questo dato è stato impiegato per determinare la producibilità attesa dell'impianto Piano Madama Giulia.



**Figura 2** – Distribuzione media del vento nell'area del Progetto

Nel presente documento, per determinare la producibilità attesa dell'impianto “**Piano Madama Giulia**”, per motivi di prossimità geografica, si assumono i dati di ventosità del sito sopra specificato per tutti gli aerogeneratori di Progetto.

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>6 di 11</b>

### 3 Curva di distribuzione delle probabilità a 90 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 **6,07 m/s**.

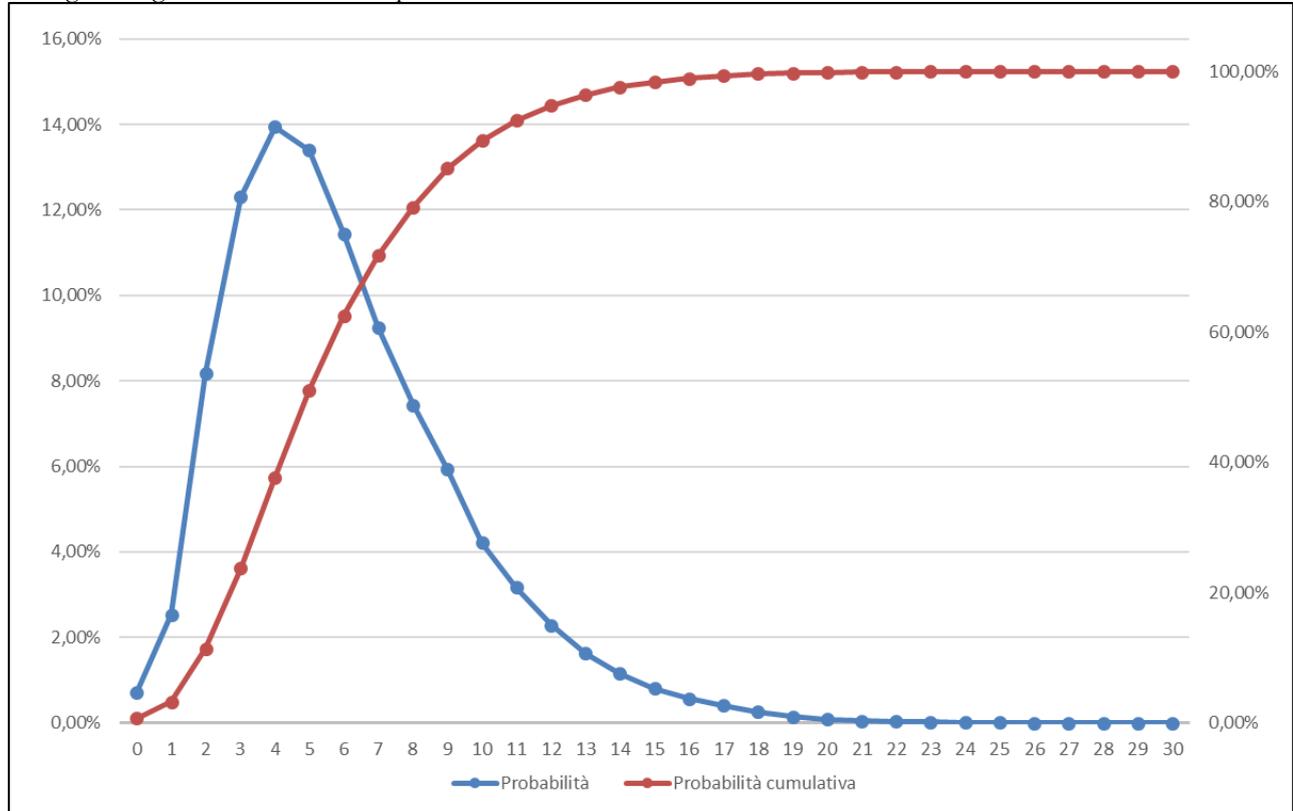
Nella seguente Tabella si riportano i risultati della modellazione della curva cumulativa e del valore specifico di probabilità di ogni valore di velocità:

Velocità vento [m/s]	Probabilità	Probabilità cumulativa
0	0,72%	0,72%
1	2,53%	3,25%
2	8,19%	11,44%
3	12,30%	23,74%
4	13,95%	37,69%
5	13,40%	51,09%
6	11,44%	62,53%
7	9,25%	71,78%
8	7,44%	79,22%
9	5,93%	85,15%
10	4,21%	89,36%
11	3,17%	92,53%
12	2,29%	94,81%
13	1,63%	96,45%
14	1,16%	97,61%
15	0,80%	98,41%
16	0,56%	98,97%
17	0,41%	99,39%
18	0,27%	99,65%
19	0,14%	99,79%
20	0,09%	99,88%
21	0,05%	99,92%
22	0,04%	99,96%
23	0,02%	99,98%
24	0,01%	99,99%
25	0,01%	99,99%
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.

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>7 di 11</b>

Di seguito il grafico ricavato dalle probabilità calcolate:



**Figura 3** – 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.



**Figura 4** – Rappresentazione della navicella

Aren Green Srl Impianto Eolico "Piano Madama Giulia"	Progetto Definitivo	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	Studio di producibilità	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>8 di 11</b>

<b>Modello</b>	SG 4.7-155
<b>Potenza</b>	4.7 MW
<b>Diametro rotore</b>	155 m
<b>Altezza mozzo</b>	90 m
<b>Regolazione potenza</b>	Controllo di frequenza e di coppia a velocità variabile
<b>Caratteristiche torre</b>	Torre conica tubolare in acciaio
<b>Area spazzata</b>	18.869 m <sup>2</sup>
<b>Numero pale</b>	3
<b>Lunghezza pale</b>	76.0 m
<b>Materiale pale</b>	Fibra di vetro epossidica rinforzata (GRE), plastica fibrorinforzata al carbonio (CRP)
<b>Tensione generatore</b>	690 V
<b>Tipo generatore</b>	Asincrono a doppia alimentazione (DFIG)
<b>Frequenza generatore</b>	50 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  $\rho^I$  diversi da quello nominale  $\rho$ .

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

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 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/m<sup>3</sup>;
- 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 27 m/s, che è la velocità di cut-off del modello.

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>9 di 11</b>

Velocità vento [m/s]	Potenza nominale aerogeneratore [kW]	Potenza effettiva [kW]			
	Densità aria 1,225 kg/m <sup>3</sup> (Datasheet)	Densità aria 1,15 kg/m <sup>3</sup>	Densità aria 1,20 kg/m <sup>3</sup>	Densità aria 1,25 kg/m <sup>3</sup>	
0	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	
2	0	0	0	1	
3	44	32	40	48	
4	243	214	233	252	
5	592	539	575	609	
6	1101	1013	1072	1130	
7	1804	1671	1760	1847	
8	2719	2552	2664	2773	
9	3723	3589	3679	3766	
10	4438	4389	4422	4454	
11	4674	4669	4672	4676	
12	4696	4695	4696	4696	
13	4700	4700	4700	4700	
14	4700	4700	4700	4700	
15	4700	4700	4700	4700	
16	4700	4700	4700	4700	
17	4699	4700	4699	4699	
18	4695	4700	4696	4694	
19	4683	4694	4687	4680	
20	4656	4700	4671	4642	
21	4549	4625	4574	4524	
22	4375	4452	4400	4350	
23	4207	4276	4230	4185	
24	4064	4118	4082	4046	
25	3956	3997	3969	3943	
26	3878	3909	3888	3868	
27	3821	4700	4528	3124	
28	0	0	0	0	
29	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	

**Tabella 4:** Potenza elettrica “Siemens Gamesa SG 4.7 – 155” 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%. 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.

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>10 di 11</b>

Fattore annuo di disponibilità [%]	Produzione annua n.15 aerogeneratori [MWh]		
	Densità aria 1,15 kg/m3	Densità aria 1,2 kg/m3	Densità aria 1,25 kg/m3
<b>96,5</b>	185546	190452	195229
<b>96,0</b>	184584	189465	194217
<b>95,5</b>	183623	188479	193205
<b>95,0</b>	182662	187492	192194
<b>94,5</b>	181700	186505	191182
<b>94,0</b>	180739	185518	190171

**Tabella 5:** Stima producibilità annua impianto “Piano Madama Giulia”

Per una potenza nominale pari a  $15 \times 4,7 \text{ MW} = 70,5 \text{ MW}$ , 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/m3	Densità aria 1,2 kg/m3	Densità aria 1,25 kg/m3
<b>96,5</b>	2632	2701	2769
<b>96,0</b>	2618	2687	2755
<b>95,5</b>	2605	2673	2741
<b>95,0</b>	2591	2659	2726
<b>94,5</b>	2577	2645	2712
<b>94,0</b>	2564	2631	2697

**Tabella 6:** Ore equivalenti di funzionamento

<b>Aren Green Srl</b> <b>Impianto Eolico</b> <b>“Piano Madama Giulia”</b>	<b>Progetto Definitivo</b>	Codice Elaborato: <b>PMGDG_GENR00200_00</b>
		Data: <b>08/02/2023</b>
	<b>Studio di producibilità</b>	Revisione: <b>00</b>
		Pagina: <b>11 di 11</b>

## 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  $\sigma_{TOT} = 14.8\%$

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
<b>P10</b>	220361	226188	231860
<b>P25</b>	201601	206932	212121
<b>P50</b>	180739	185518	190171
<b>P75</b>	159877	164105	168220
<b>P90</b>	141117	144848	148481
<b>P99</b>	108851	111729	114531

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