

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

COMUNE DI MANFREDONIA (FG)
LOCALITA' BORGO FONTE ROSA

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI **IMPIANTO EOLICO** **“BORGO FONTE ROSA 2”**

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:

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

CODICE ELABORATO:

BFRDT_GENR03800_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	11/12/2023	P. Amati	F. Piccinini	L. Masini
01					
02					
03					
04					

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 1 di 14

1	Introduzione	2
2	Ipotesi di calcolo	2
3	Calcolo della legge del moto.....	3
4	Calcolo della gittata nel caso di distacco nel punto di attacco del mozzo.....	5
4.1	Schema di calcolo.....	5
4.2	Calcolo del baricentro	5
4.3	Calcolo della velocità periferica	5
4.4	Calcolo di H_g	6
4.5	Calcolo della gittata.....	6
5	Calcolo della gittata nel caso di rottura di un frammento pari a 5 metri.....	9
5.1	Schema di calcolo.....	9
5.2	Calcolo del baricentro	9
5.3	Calcolo della velocità periferica	9
5.4	Calcolo di H_g	10
5.5	Calcolo della gittata.....	10
6	Applicazione dello studio al progetto in esame.....	13
7	Conclusioni.....	13

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 2 di 14

1 Introduzione

Il progetto in oggetto consiste nella realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica mediante lo sfruttamento del vento, da ubicarsi in Comune di Manfredonia (FG), proposto dalla società AREN Green Srl.

L'impianto è costituito da n. 10 aerogeneratori (modello Siemens Gamesa diametro 155 altezza hub 90 m) localizzati in località Borgo Fonte Rosa, di potenza unitaria 4,7 MW, per una potenza complessiva dell'impianto di 47 MW.

L'intero impianto, comprese le opere di connessione, è ubicato all'interno del Comune di Manfredonia.

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del modello Siemens Gamesa, diametro 155 m, altezza hub 90 m e potenza 4,7 MW, in caso di rottura; tale calcolo è stato eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare danno a cose e/o persone. Nel calcolo si ipotizza il distacco della pala nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Lo studio riporta inoltre il calcolo della gittata nelle seguenti ipotesi:

- Rottura dell'intera pala;
- Rottura del frammento di pala (lunghezza 5 m).

Con riferimento al distacco del frammento e all'angolo di maggiore gittata, si riportano i passaggi del calcolo della gittata al fine di giustificare il valore ottenuto.

2 Ipotesi di calcolo

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose e consentono di giungere a risultati cautelativi; si vuole precisare, inoltre, che le probabilità di accadimento di rotture per aerogeneratori industriali di grande taglia sono molto basse.

Il calcolo della gittata massima è stato effettuato considerando una riduzione massima della velocità periferica del 30%, senza ridurre la velocità angolare.

Per il calcolo si effettuano le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);
- si è considerata la riduzione della velocità periferica pari al 30% per tener conto degli effetti della resistenza dovuta al mezzo in cui si svolge il moto (aria) e per considerare le forze di resistenza che si generano al momento di rottura della pala;
- il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo θ ;
- la velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo (Figura 2) sono i seguenti:

- Altezza della torre $H = 90$ m
- Diametro del rotore $D = 155$ m
- Lunghezza della pala $R = 76$ m
- Altezza massima dell'aerogeneratore $H+R = 166$ m
- Velocità di rotazione $V = 11,2$ giri/min.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 3 di 14

3 Calcolo della legge del moto

Nel presente paragrafo viene descritta la relazione del moto utilizzata per il calcolo della gittata.

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati con un angolo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico.

Si precisa che la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile. Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti più grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono: tale premessa è utile per ritenere non trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (l'aria).

Nel caso di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = Ma_g$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Supponendo di concentrare tutto il peso nel centro di massa della pala, il momento della forza peso è nullo, (avendo scelto G come polo per il calcolo dei momenti). Pertanto la seconda equazione rivela che il corpo durante la traiettoria che percorre, gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione al problema si ottiene risolvendo allora la prima equazione. Questa dimostra che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme, pertanto compirà il caratteristico moto parabolico.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo g) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo.

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si è utilizzato un sistema di riferimento cartesiano xy in cui l'origine O degli assi del sistema, coincide con il punto da cui il proiettile è lanciato.

Si è scelto un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo (x_0, y_0), con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno:

$$\ddot{x} = 0$$

$$\ddot{y} = -g$$

dove $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

Si rappresenta la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale v_0 e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di ϑ come in Figura 1:

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Data: 11/12/2023
		Revisione: 00
		Pagina: 4 di 14

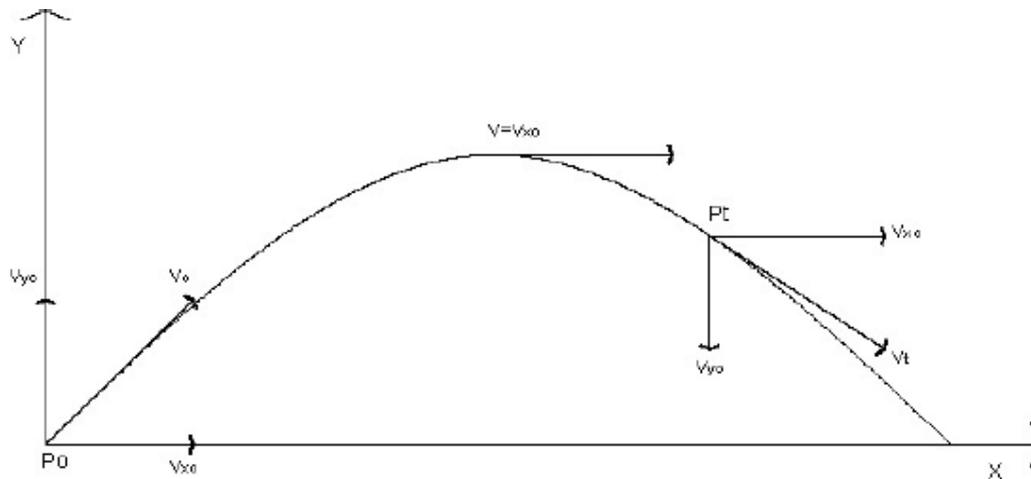


Figura 1: Traiettoria di un grave in caduta

La legge del moto, soluzione delle equazioni indicate in precedenza, è:

$$x(t) = x_0 + v_x \cdot t$$

$$y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

dove (x_0, y_0) è la posizione iniziale del punto materiale e (v_x, v_y) è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercutta il suolo al tempo T tale che $y(T) = 0$. Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \sqrt{v_y^2 + 2 \cdot y_0 \cdot g}$$

da cui è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo ϑ e dalla velocità tangenziale V della pala al momento del distacco. Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle seguenti relazioni:

$$x_0 = -R \cdot \cos \vartheta$$

$$y_0 = H + R \cdot \sin \vartheta$$

$$v_x = V \cdot \sin \vartheta$$

$$v_y = V \cdot \cos \vartheta$$

Dalla legge del moto otteniamo la gittata: $G = x(t)$

Sostituendo l'espressione per T ricavata sopra, otteniamo la gittata G in funzione di V e di ϑ :

$$G_{max} = \frac{V_g \cdot \sin \vartheta}{g} \left[V_g \cdot \cos \vartheta + \sqrt{V_g^2 \cdot \cos^2 \vartheta + 2 \cdot (H + R_g \cdot \sin \vartheta) \cdot g} \right] - R_g \cdot \cos \vartheta$$

Si noti che, fissato un generico angolo ϑ , la gittata aumenta quadraticamente con V, salvo i casi particolari:

$\vartheta = \pm 90^\circ; 0^\circ; 180^\circ$, nei quali la gittata aumenta linearmente con V oppure è pari ad R.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Data: 11/12/2023
		Revisione: 00
		Pagina: 5 di 14

4 Calcolo della gittata nel caso di distacco nel punto di attacco del mozzo

4.1 Schema di calcolo

Lo schema adottato per il calcolo della gittata è il seguente:

R = raggio del baricentro

V = velocità periferica del baricentro

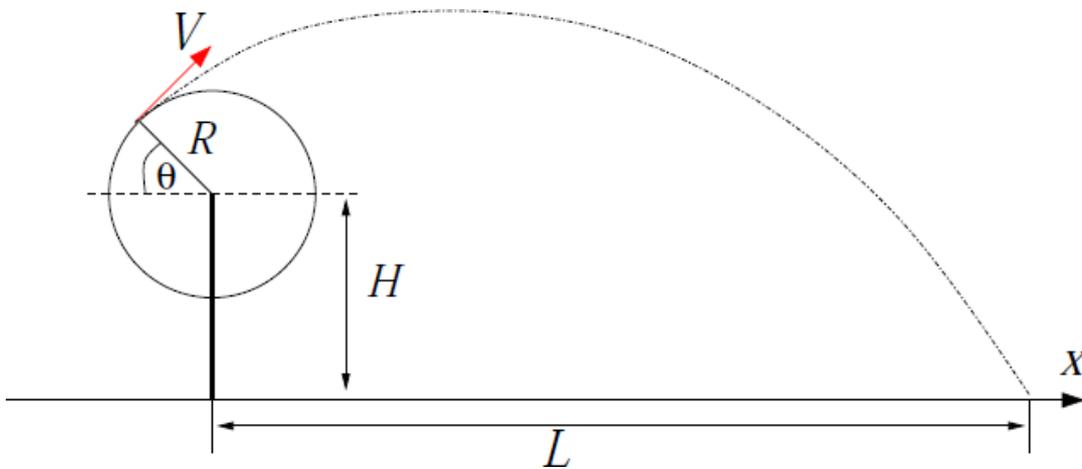


Figura 2: Schema adottato per il calcolo della gittata

Prima di effettuare il calcolo della gittata sono stati calcolati i seguenti parametri.

4.2 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si può ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala.

$$R_g = \frac{1}{3} \cdot L = 25,33 \text{ m}$$

per l'aerogeneratore di progetto (essendo $L = 76 \text{ m}$).

4.3 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Indicando con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare e tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, ovvero la velocità angolare ω del corpo in movimento. Il dato di partenza è $n = 12,6$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 1,32 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio R percorre la circonferenza $2 \cdot \pi \cdot R$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2 \cdot \pi \cdot R \cdot n$

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 6 di 14

metri/minuto. Questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore pari a 11,2 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot R_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot R_g = 29,71 \frac{m}{s}$$

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 30%, per cui il valore reale è 20,79 m/s.

4.4 Calcolo di H_g

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia $R_g = 25,33$ m, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 76 m.

Di conseguenza l'altezza di lancio (H_g) sarà uguale all'altezza del mozzo più il valore della proiezione di R_g sulla verticale ossia:

$$H_g = H_{hub} + (R_g \cdot \sin \vartheta)$$

dove H_{hub} è l'altezza del mozzo.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

4.5 Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo ϑ . La tabella seguente mostra i valori ottenuti della gittata:

Angolo θ	radiani	sen θ	cos θ	H_g	Gittata Teorica	Lg	Gittata Effettiva
0	0	0	1	90.00	-25.33	50.67	25.33
1	0.017453	0.017452	0.999848	90.44	-22.82	50.67	27.85
2	0.034907	0.034899	0.999391	90.88	-20.28	50.67	30.38
3	0.05236	0.052336	0.99863	91.33	-17.73	50.67	32.94
4	0.069813	0.069756	0.997564	91.77	-15.16	50.67	35.50
5	0.087266	0.087156	0.996195	92.21	-12.58	50.67	38.09
6	0.10472	0.104528	0.994522	92.65	-9.99	50.67	40.68
7	0.122173	0.121869	0.992546	93.09	-7.38	50.67	43.28
8	0.139626	0.139173	0.990268	93.53	-4.77	50.67	45.90
9	0.15708	0.156434	0.987688	93.96	-2.15	50.67	48.51
10	0.174533	0.173648	0.984808	94.40	0.47	50.67	51.14
11	0.191986	0.190809	0.981627	94.83	3.10	50.67	53.76
12	0.20944	0.207912	0.978148	95.27	5.72	50.67	56.39
13	0.226893	0.224951	0.97437	95.70	8.35	50.67	59.01
14	0.244346	0.241922	0.970296	96.13	10.97	50.67	61.64
15	0.261799	0.258819	0.965926	96.56	13.59	50.67	64.25

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 7 di 14

Angolo θ	radianti	sen θ	cos θ	Hg	Gittata Teorica	Lg	Gittata Effettiva
16	0.279253	0.275637	0.961262	96.98	16.20	50.67	66.86
17	0.296706	0.292372	0.956305	97.41	18.80	50.67	69.46
18	0.314159	0.309017	0.951057	97.83	21.39	50.67	72.06
19	0.331613	0.325568	0.945519	98.25	23.97	50.67	74.64
20	0.349066	0.34202	0.939693	98.66	26.53	50.67	77.20
21	0.366519	0.358368	0.93358	99.08	29.09	50.67	79.75
22	0.383972	0.374607	0.927184	99.49	31.62	50.67	82.29
23	0.401426	0.390731	0.920505	99.90	34.13	50.67	84.80
24	0.418879	0.406737	0.913545	100.30	36.63	50.67	87.29
25	0.436332	0.422618	0.906308	100.71	39.10	50.67	89.77
26	0.453786	0.438371	0.898794	101.11	41.55	50.67	92.21
27	0.471239	0.45399	0.891007	101.50	43.97	50.67	94.64
28	0.488692	0.469472	0.882948	101.89	46.37	50.67	97.03
29	0.506145	0.48481	0.87462	102.28	48.74	50.67	99.40
30	0.523599	0.5	0.866025	102.67	51.08	50.67	101.74
31	0.541052	0.515038	0.857167	103.05	53.39	50.67	104.05
32	0.558505	0.529919	0.848048	103.42	55.66	50.67	106.33
33	0.575959	0.544639	0.838671	103.80	57.91	50.67	108.57
34	0.593412	0.559193	0.829038	104.17	60.11	50.67	110.78
35	0.610865	0.573576	0.819152	104.53	62.29	50.67	112.95
36	0.628319	0.587785	0.809017	104.89	64.42	50.67	115.09
37	0.645772	0.601815	0.798636	105.25	66.52	50.67	117.19
38	0.663225	0.615661	0.788011	105.60	68.58	50.67	119.25
39	0.680678	0.62932	0.777146	105.94	70.60	50.67	121.27
40	0.698132	0.642788	0.766044	106.28	72.58	50.67	123.24
41	0.715585	0.656059	0.75471	106.62	74.51	50.67	125.18
42	0.733038	0.669131	0.743145	106.95	76.40	50.67	127.07
43	0.750492	0.681998	0.731354	107.28	78.25	50.67	128.92
44	0.767945	0.694658	0.71934	107.60	80.06	50.67	130.73
45	0.785398	0.707107	0.707107	107.91	81.82	50.67	132.48
46	0.802851	0.71934	0.694658	108.22	83.53	50.67	134.20
47	0.820305	0.731354	0.681998	108.53	85.20	50.67	135.87
48	0.837758	0.743145	0.669131	108.83	86.82	50.67	137.49
49	0.855211	0.75471	0.656059	109.12	88.39	50.67	139.06
50	0.872665	0.766044	0.642788	109.41	89.92	50.67	140.58
51	0.890118	0.777146	0.62932	109.69	91.39	50.67	142.06
52	0.907571	0.788011	0.615661	109.96	92.82	50.67	143.49
53	0.925025	0.798636	0.601815	110.23	94.20	50.67	144.86
54	0.942478	0.809017	0.587785	110.50	95.53	50.67	146.19

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Data: 11/12/2023
		Revisione: 00
		Pagina: 8 di 14

Angolo θ	radianti	sen θ	cos θ	Hg	Gittata Teorica	Lg	Gittata Effettiva
55	0.959931	0.819152	0.573576	110.75	96.81	50.67	147.47
56	0.977384	0.829038	0.559193	111.00	98.03	50.67	148.70
57	0.994838	0.838671	0.544639	111.25	99.21	50.67	149.88
58	1.012291	0.848048	0.529919	111.48	100.34	50.67	151.01
59	1.029744	0.857167	0.515038	111.71	101.42	50.67	152.09
60	1.047198	0.866025	0.5	111.94	102.45	50.67	153.12
61	1.064651	0.87462	0.48481	112.16	103.43	50.67	154.09
62	1.082104	0.882948	0.469472	112.37	104.35	50.67	155.02
63	1.099557	0.891007	0.45399	112.57	105.23	50.67	155.90
64	1.117011	0.898794	0.438371	112.77	106.06	50.67	156.73
65	1.134464	0.906308	0.422618	112.96	106.84	50.67	157.51
66	1.151917	0.913545	0.406737	113.14	107.57	50.67	158.23
67	1.169371	0.920505	0.390731	113.32	108.25	50.67	158.91
68	1.186824	0.927184	0.374607	113.49	108.88	50.67	159.55
69	1.204277	0.93358	0.358368	113.65	109.46	50.67	160.13
70	1.22173	0.939693	0.34202	113.81	109.99	50.67	160.66
71	1.239184	0.945519	0.325568	113.95	110.48	50.67	161.15
72	1.256637	0.951057	0.309017	114.09	110.92	50.67	161.59
73	1.27409	0.956305	0.292372	114.23	111.31	50.67	161.98
74	1.291544	0.961262	0.275637	114.35	111.66	50.67	162.32
75	1.308997	0.965926	0.258819	114.47	111.96	50.67	162.62
76	1.32645	0.970296	0.241922	114.58	112.21	50.67	162.88
77	1.343904	0.97437	0.224951	114.68	112.42	50.67	163.09
78	1.361357	0.978148	0.207912	114.78	112.59	50.67	163.26
79	1.37881	0.981627	0.190809	114.87	112.71	50.67	163.38
80	1.396263	0.984808	0.173648	114.95	112.79	50.67	163.46
81	1.413717	0.987688	0.156434	115.02	112.83	50.67	163.49
82	1.43117	0.990268	0.139173	115.09	112.82	50.67	163.49
83	1.448623	0.992546	0.121869	115.14	112.78	50.67	163.44
84	1.466077	0.994522	0.104528	115.19	112.69	50.67	163.36
85	1.48353	0.996195	0.087156	115.24	112.57	50.67	163.24
86	1.500983	0.997564	0.069756	115.27	112.41	50.67	163.07
87	1.518436	0.99863	0.052336	115.30	112.20	50.67	162.87
88	1.53589	0.999391	0.034899	115.32	111.97	50.67	162.63
89	1.553343	0.999848	0.017452	115.33	111.69	50.67	162.36
90	1.570796	1	6.13E-17	115.33	111.38	50.67	162.05

Tabella 1: Calcolo della gittata teorica, in funzione dei diversi valori dell'angolo θ , nel caso di distacco dell'intera pala nel punto di attacco del mozzo.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 9 di 14

La gittata massima si ottiene per $\vartheta=81^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **112,83 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima teorica per il distacco in corrispondenza del mozzo.

Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della velocità periferica in modo da tener conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza che si generano al momento della rottura.

Noto il valore di gittata massima teorica e date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare la gittata massima effettiva.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più gravosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene che la gittata massima effettiva è pari al valore massimo di gittata teorica + i 2/3 della lunghezza della pala ovvero:

- Punto massima caduta: $112,83 + 50,66 = \mathbf{163,49\ m}$

5 Calcolo della gittata nel caso di rottura di un frammento pari a 5 metri

5.1 Schema di calcolo

Lo schema adottato per il calcolo della gittata nel caso di rottura del frammento di 5 m di una pala è simile a quello adottato per il distacco nel punto di attacco del mozzo.

Si individuano le seguenti grandezze:

- R = raggio del baricentro del frammento (ovvero distanza del baricentro dal mozzo);
- V = velocità periferica del baricentro.

Prima di effettuare il calcolo della gittata sono stati calcolati i seguenti parametri.

5.2 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala e del frammento, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo del frammento, si può ritenere con buona approssimazione che il baricentro del frammento sia determinato dalla seguente relazione:

$$R_g = L - \frac{2}{3} \text{lunghezza frammento} = 72,7\ m$$

essendo $L = 76\ m$ e il frammento lungo $5\ m$.

5.3 Calcolo della velocità periferica

Le modalità con le quali vengono calcolate la velocità periferica e la velocità angolare seguono quanto descritto nel paragrafo 3.2.

La velocità angolare media ω , che rappresenta l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo, è funzione del numero di giri a minuto (nel caso in esame $n = 11,2\ \text{giri/min}$) ed è pari a:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 1,17 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

La velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio e alla velocità angolare, e corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot R_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot R_g = 92,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 10 di 14

Tenendo conto dell'attrito dell'aria e delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 30%, per cui il valore reale è 59,6 m/s.

5.4 Calcolo di H_g

Il raggio del baricentro del frammento è pari a 72,7 m.

L'altezza di lancio (H_g) sarà uguale all'altezza del mozzo sommata al valore della proiezione di R_g sulla verticale ossia:

$$H_g = H_{hub} + (R_g \cdot \sin \vartheta)$$

dove H_{hub} è l'altezza del mozzo.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale viene valutato per i diversi valori dell'angolo ϑ .

5.5 Calcolo della gittata

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo ϑ . La tabella seguente mostra i valori della gittata massima teorica.

La gittata massima teorica del frammento di 5 m si ottiene per $\vartheta=60^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **501,8 m**. Si ricorda che tale valore è stato determinato effettuando una riduzione del 30% della velocità dovuto all'attrito dell'aria e delle forze resistenti che si generano al momento della rottura del frammento.

Nota il valore di gittata massima teorica, date le caratteristiche geometriche del frammento si può calcolare la gittata massima effettiva. Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più gravosa, ossia quella in cui il frammento cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene che il punto più lontano di caduta è pari al valore massimo di gittata teorica + i 2/3 della lunghezza del frammento ovvero:

Gittata massima effettiva: $498,54 + 3,33 = \mathbf{501,88 \text{ m}}$

Angolo θ	radiani	sen θ	cos θ	Hg	Gittata Teorica	Lg	Gittata Effettiva
0	0	0	1	90.00	-72.67	3.33	-69.33
1	0.017453	0.017452	0.999848	91.27	-58.54	3.33	-55.21
2	0.034907	0.034899	0.999391	92.54	-44.34	3.33	-41.01
3	0.05236	0.052336	0.99863	93.80	-30.08	3.33	-26.74
4	0.069813	0.069756	0.997564	95.07	-15.76	3.33	-12.43
5	0.087266	0.087156	0.996195	96.33	-1.41	3.33	1.92
6	0.10472	0.104528	0.994522	97.60	12.95	3.33	16.29
7	0.122173	0.121869	0.992546	98.86	27.32	3.33	30.66
8	0.139626	0.139173	0.990268	100.11	41.68	3.33	45.01
9	0.15708	0.156434	0.987688	101.37	56.01	3.33	59.35
10	0.174533	0.173648	0.984808	102.62	70.30	3.33	73.64
11	0.191986	0.190809	0.981627	103.87	84.54	3.33	87.87
12	0.20944	0.207912	0.978148	105.11	98.70	3.33	102.04
13	0.226893	0.224951	0.97437	106.35	112.79	3.33	116.12
14	0.244346	0.241922	0.970296	107.58	126.77	3.33	130.10
15	0.261799	0.258819	0.965926	108.81	140.64	3.33	143.97

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 11 di 14

Angolo θ	radianti	sen θ	cos θ	Hg	Gittata Teorica	Lg	Gittata Effettiva
16	0.279253	0.275637	0.961262	110.03	154.39	3.33	157.72
17	0.296706	0.292372	0.956305	111.25	168.00	3.33	171.33
18	0.314159	0.309017	0.951057	112.46	181.46	3.33	184.79
19	0.331613	0.325568	0.945519	113.66	194.75	3.33	198.09
20	0.349066	0.34202	0.939693	114.85	207.87	3.33	211.21
21	0.366519	0.358368	0.93358	116.04	220.81	3.33	224.14
22	0.383972	0.374607	0.927184	117.22	233.54	3.33	236.87
23	0.401426	0.390731	0.920505	118.39	246.06	3.33	249.40
24	0.418879	0.406737	0.913545	119.56	258.36	3.33	261.70
25	0.436332	0.422618	0.906308	120.71	270.43	3.33	273.77
26	0.453786	0.438371	0.898794	121.85	282.26	3.33	285.59
27	0.471239	0.45399	0.891007	122.99	293.84	3.33	297.17
28	0.488692	0.469472	0.882948	124.11	305.15	3.33	308.49
29	0.506145	0.48481	0.87462	125.23	316.20	3.33	319.53
30	0.523599	0.5	0.866025	126.33	326.96	3.33	330.30
31	0.541052	0.515038	0.857167	127.43	337.45	3.33	340.78
32	0.558505	0.529919	0.848048	128.51	347.63	3.33	350.97
33	0.575959	0.544639	0.838671	129.58	357.52	3.33	360.85
34	0.593412	0.559193	0.829038	130.63	367.10	3.33	370.43
35	0.610865	0.573576	0.819152	131.68	376.36	3.33	379.69
36	0.628319	0.587785	0.809017	132.71	385.31	3.33	388.64
37	0.645772	0.601815	0.798636	133.73	393.93	3.33	397.26
38	0.663225	0.615661	0.788011	134.74	402.22	3.33	405.55
39	0.680678	0.62932	0.777146	135.73	410.17	3.33	413.51
40	0.698132	0.642788	0.766044	136.71	417.79	3.33	421.12
41	0.715585	0.656059	0.75471	137.67	425.07	3.33	428.40
42	0.733038	0.669131	0.743145	138.62	432.00	3.33	435.34
43	0.750492	0.681998	0.731354	139.56	438.59	3.33	441.93
44	0.767945	0.694658	0.71934	140.48	444.83	3.33	448.17
45	0.785398	0.707107	0.707107	141.38	450.73	3.33	454.06
46	0.802851	0.71934	0.694658	142.27	456.27	3.33	459.60
47	0.820305	0.731354	0.681998	143.15	461.46	3.33	464.80
48	0.837758	0.743145	0.669131	144.00	466.31	3.33	469.64
49	0.855211	0.75471	0.656059	144.84	470.80	3.33	474.13
50	0.872665	0.766044	0.642788	145.67	474.94	3.33	478.28
51	0.890118	0.777146	0.62932	146.47	478.74	3.33	482.08
52	0.907571	0.788011	0.615661	147.26	482.20	3.33	485.53
53	0.925025	0.798636	0.601815	148.03	485.31	3.33	488.64
54	0.942478	0.809017	0.587785	148.79	488.08	3.33	491.42
55	0.959931	0.819152	0.573576	149.53	490.52	3.33	493.85

AREN Green S.r.l.

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

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

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



AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 12 di 14

Angolo θ	radianti	sen θ	cos θ	Hg	Gittata Teorica	Lg	Gittata Effettiva
56	0.977384	0.829038	0.559193	150.24	492.62	3.33	495.96
57	0.994838	0.838671	0.544639	150.94	494.40	3.33	497.74
58	1.012291	0.848048	0.529919	151.62	495.86	3.33	499.19
59	1.029744	0.857167	0.515038	152.29	496.99	3.33	500.33
60	1.047198	0.866025	0.5	152.93	497.81	3.33	501.15
61	1.064651	0.87462	0.48481	153.56	498.33	3.33	501.66
62	1.082104	0.882948	0.469472	154.16	498.54	3.33	501.88
63	1.099557	0.891007	0.45399	154.75	498.46	3.33	501.80
64	1.117011	0.898794	0.438371	155.31	498.09	3.33	501.43
65	1.134464	0.906308	0.422618	155.86	497.44	3.33	500.77
66	1.151917	0.913545	0.406737	156.38	496.51	3.33	499.85
67	1.169371	0.920505	0.390731	156.89	495.32	3.33	498.65
68	1.186824	0.927184	0.374607	157.38	493.87	3.33	497.20
69	1.204277	0.93358	0.358368	157.84	492.16	3.33	495.50
70	1.22173	0.939693	0.34202	158.28	490.22	3.33	493.55
71	1.239184	0.945519	0.325568	158.71	488.03	3.33	491.37
72	1.256637	0.951057	0.309017	159.11	485.62	3.33	488.96
73	1.27409	0.956305	0.292372	159.49	483.00	3.33	486.33
74	1.291544	0.961262	0.275637	159.85	480.16	3.33	483.49
75	1.308997	0.965926	0.258819	160.19	477.12	3.33	480.45
76	1.32645	0.970296	0.241922	160.51	473.88	3.33	477.22
77	1.343904	0.97437	0.224951	160.80	470.47	3.33	473.80
78	1.361357	0.978148	0.207912	161.08	466.87	3.33	470.21
79	1.37881	0.981627	0.190809	161.33	463.12	3.33	466.45
80	1.396263	0.984808	0.173648	161.56	459.20	3.33	462.53
81	1.413717	0.987688	0.156434	161.77	455.13	3.33	458.47
82	1.43117	0.990268	0.139173	161.96	450.93	3.33	454.26
83	1.448623	0.992546	0.121869	162.13	446.59	3.33	449.93
84	1.466077	0.994522	0.104528	162.27	442.13	3.33	445.47
85	1.48353	0.996195	0.087156	162.39	437.56	3.33	440.89
86	1.500983	0.997564	0.069756	162.49	432.87	3.33	436.21
87	1.518436	0.99863	0.052336	162.57	428.09	3.33	431.43
88	1.53589	0.999391	0.034899	162.62	423.22	3.33	426.56
89	1.553343	0.999848	0.017452	162.66	418.27	3.33	421.60
90	1.570796	1	6.13E-17	162.67	413.24	3.33	416.57

Tabella 2: Calcolo della gittata teorica, in funzione dei diversi valori dell'angolo θ , nel caso di rottura di un frammento di pala di lunghezza 5 m.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Data: 11/12/2023
		Revisione: 00
		Pagina: 13 di 14

6 Applicazione dello studio al progetto in esame

Nel progetto in esame si prevede la realizzazione di 10 aerogeneratori del modello Siemens Gamesa con diametro 155 m e altezza mozzo 90 m localizzati in località Borgo Fonte Rosa, di potenza unitaria 4,7 MW, per una potenza complessiva dell’impianto di 47 MW.

Il calcolo della gittata massima appena descritto mostra come tale valore, nel caso maggiormente cautelativo, si attesti a 501,88 m.

È stata considerata una distanza di 580 m da ogni aerogeneratore e dall’immagine sottostante emerge che le strade principali e le abitazioni si trovano oltre tale distanza. In area limitrofa all’aerogeneratore BR1 ci sono alcuni fabbricati ma non classificati come abitazioni. Per ogni approfondimento si rimanda all’elaborato grafico “BFRDT_GENT01800_00_Planimetria generale con distanze tra WTG e edifici e strade esistenti”.



Figura 3: Ubicazione degli aerogeneratori rispetto alle strade ed edifici esistenti.

7 Conclusioni

La presente relazione descrive il calcolo eseguito al fine della valutazione della gittata massima che si verifica in caso di rottura accidentale di un aerogeneratore. In base a quanto riportato, il punto di caduta più lontano, nel caso di rottura dell’intera pala corrisponde a **163,5 m** e nel caso di rottura di un frammento della lunghezza di 5 m corrisponde a **501,88 m**. I valori di gittata sono stati ottenuti considerando una riduzione della velocità periferica del 30%, per tener conto delle forze resistenti e dell’attrito dell’aria.

Le distanze degli aerogeneratori di progetto dalle strade provinciali/statali/autostrade e dagli edifici esistenti risultano maggiori ai valori di gittata ottenuti. Si conclude quindi che nell’ipotesi remota di rottura di un aerogeneratore, l’impianto in progetto risulti sicuro.

AREN Green S.r.l. Impianto Eolico “Borgo Fonte Rosa 2”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: BFRDT_GENR03800_00
		Data: 11/12/2023
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 14 di 14

Si sottolinea che dalla pratica sul campo per questo tipo di impianti, oltre che da studi specialistici pubblicati, il fenomeno della rottura dell'aerogeneratore risulta una eventualità molto remota.

Si conclude, quindi, che il progetto dell'impianto eolico, proposto dalla società AREN Green Srl nel territorio del Comune di Manfredonia (FG) in località “Borgo Fonte Rosa”, costituito da 10 aerogeneratori del tipo Vestas con diametro 155 m e altezza al mozzo 90 m di potenza unitaria pari a 4,7 MW, non ostacola la pubblica sicurezza nell'ipotesi remota di rottura di una pala o di un frammento di essa.