



Progetto per la realizzazione impianto per la produzione di energia elettrica da **fonte eolica**, ai sensi del Dlgs n. 387 del 2003, composto da n° 7 aerogeneratori, per una potenza di 39,2 MW, sito nel comune di **Castelpagano (BN)**



REGIONE  
CAMPANIA

PROPONENTE



COMUNE DI  
CASTELPAGANO

**Cogein  
Energy**

**Cogein Energy S.r.l.**

Via Diocleziano, 107 - 80125 Napoli  
Tel. 081.19566613 - Fax. 081.7618640

[www.newgreen.it](http://www.newgreen.it)

[compinvestimenti@libero.it](mailto:compinvestimenti@libero.it)

[cogeinenergy@pec.it](mailto:cogeinenergy@pec.it)



COMUNE DI  
CIRCELLO

ELABORATO

**ELAB.8**

Analisi rottura degli elementi rotanti



COMUNE DI  
COLLE SANNITA

SCALA

REVISIONE

DATA

**06/2022**

PROGETTAZIONE

**Arch. Raimondo Cascone**

REDATTO

**Ing. Federica Mallozzi**

**Ing. Maria Grazia Puocci**

VERIFICATO

**Ing. Federica Mallozzi**

APPROVATO

**Arch. Raimondo Cascone**



COMUNE DI  
MORCONE

## Sommario

<b>1. Premessa</b> .....	<b>2</b>
<b>2. Studio della gittata massima</b> .....	<b>2</b>
2.1 Calcolo della velocità periferica.....	4
2.2 Studio del moto del proiettile.....	5
2.3 Calcolo della massima gittata.....	7
<b>3. Calcolo Della Gittata Massima – distacco frammento di 10 m</b> .....	<b>14</b>
<b>4. Calcolo Della Gittata Massima – Distacco Frammento 5 m</b> .....	<b>17</b>
<b>5. Probabilità di accadimento</b> .....	<b>17</b>
<b>6. Conclusioni</b> .....	<b>19</b>

## 1. Premessa

L'obiettivo del presente studio è quello di determinare la distanza che la pala dell'aerogeneratore può raggiungere nel caso di distacco del mozzo durante il funzionamento. La rottura accidentale di un elemento rotante è da considerarsi un evento raro; tuttavia, al fine della sicurezza è importante stimare la gittata massima degli elementi rotanti. Nel caso remoto di distacco della pala, la rottura si avrebbe in corrispondenza della giunzione tra la blade ed il mozzo.

Tale documento riporta lo studio per il calcolo della gittata massima della pala, con riferimento all'impianto da 39,2 MW composto da 7 aerogeneratori di potenza nominale 5,6 MW ciascuno, ubicato nel comune di Castelpagano (BN).

L'aerogeneratore in questione è del tipo Vestas V150 – 5.6 MW 50/60 HZ avente le seguenti caratteristiche:

Potenza nominale	5600 kW
Turbina	rotore tripala ad asse orizzontale sopravvento, rotazione oraria velocità variabile
Diametro Rotorico	<b>150 m</b>
Altezza della torre	<b>105 m</b>
Velocità Cut-in	3 m/s
Velocità Cut-out	25 m/s
Velocità nominale	4.9 - 12.6 giri al minuto
Freno	3 sistemi autonomi di regolazione pale con alimentazione di emergenza. Freno di tenuta rotore. Blocco rotore.
Torre	tubolare conica in acciaio verniciato suddivisa in più sezioni preassemblate in officina.

Tabella 1- Caratteristiche aerogeneratore

## 2. Studio della gittata massima

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo.

Sotto il profilo fisico il calcolo della gittata è assimilabile allo studio del moto di un proiettile, in cui dal punto di vista teorico la gittata maggiore si avrebbe nel caso di distacco nella posizione palare di  $45^\circ$ . In realtà la complessità aerodinamica di un aerogeneratore fa sì che la massima gittata si ottenga per posizioni angolari minori.

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, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico.

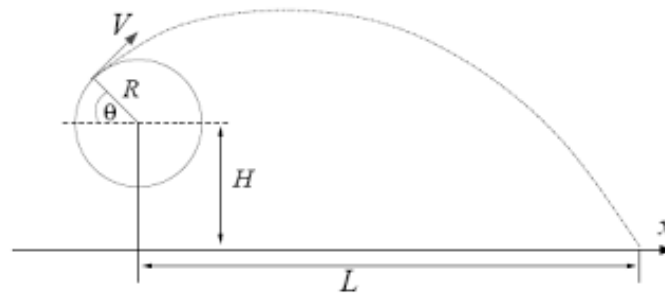


Figura 1 Schematizzazione gittata aerogeneratore

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.

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- dal tempo di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;

- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

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) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano XY in cui l'origine O degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

## 2.1 Calcolo della velocità periferica

Per il calcolo della gittata, elemento fondamentale è rappresentato dalla velocità angolare media  $\omega$  ovvero l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo.

Tale velocità è data dal n il numero di giri al minuto primo, compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a  $2\pi$  radianti, per n giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, ovvero la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento.

Pertanto la velocità angolare è data da:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

Mentre la velocità periferica in m/s di un corpo rotante, considerando la velocità massima del rotore di 12,6 giri al minuto, corrisponde a:

$$v_0 = \omega * r_g = (2\pi * n * r_g)/60 = 32,99 \text{ m/s}$$

Dove:

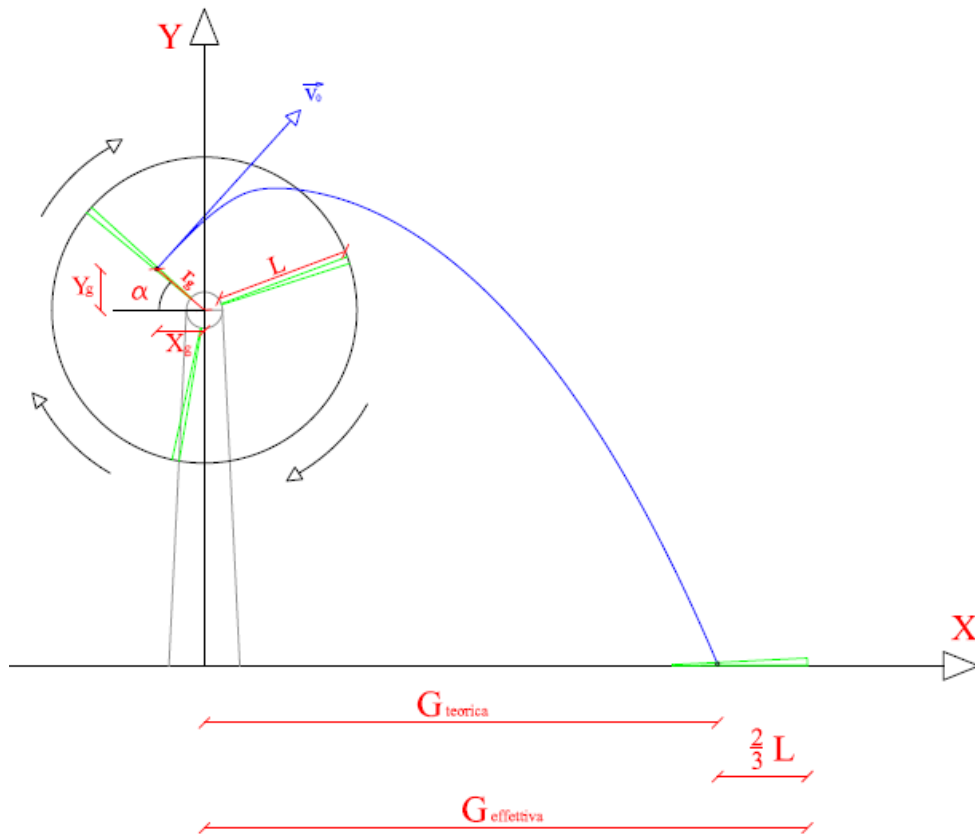
$$r_g = D/2 - L + L/3$$

Con L pari alla lunghezza della pala;  $r_g$  rappresenta la posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo. Infatti, 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, in tal caso  $r_g = 25$  m a partire dal mozzo, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 75 m. L'oggetto che accidentalmente si distacca è pari alla lunghezza dell'intera blade fino all'attacco con il mozzo, e quindi è pari a 81,00 m con uno spessore variabile fino all'estremità della pala.

## 2.2 Studio del moto del proiettile

Considereremo inizialmente il moto bidimensionale di un punto materiale tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Sceglieremo un sistema di riferimento così come in figura:



Il calcolo della gittata, quindi, è effettuato in funzione dell'angolo di inclinazione della pala rispetto all'orizzontale, in senso orario e ponendo l'angolo di  $0^\circ$  tra il 3° e il 4° quadrante.

La velocità  $v_0$  ha componenti nelle due direzioni:

$$v_{x0} = v_0 \cos(90 - \alpha) = v_0 \sin \alpha$$

$$v_{y0} = v_0 \sin(90 - \alpha) = v_0 \cos \alpha$$

con  $\alpha$  pari all'angolo della pala rispetto all'orizzontale.

La gittata è la distanza percorsa dal punto materiale in direzione x prima di toccare terra.

Le equazioni del moto di un punto materiale, soggetto unicamente alla forza di gravità, risultano:

$$x = 0$$

$$y = -g$$

con g accelerazione di gravità.

La soluzione delle equazioni suddette è la legge del moto, ossia:

$$x(t) = x_0 + v_x * t$$

$$y(t) = y_0 + v_y * t - 1/2 * g * t^2$$

dove  $x_0$  e  $y_0$  rappresentano la posizione iniziale del punto materiale e  $v_x$  e  $v_y$  la velocità del punto materiale. Il punto materiale avrà una traiettoria che interseca il suolo al tempo t, tale per cui  $y(t)=0$ .

Pertanto, dalla legge del moto di cui sopra si ottiene:

$$t = v_y/g + 1/g * \sqrt{(v_y^2 + 2v_0 * g)}$$

Dalla legge del moto si ottiene che:

$$G = x(t)$$

Sostituendo t con l'espressione ricavata in precedenza, si ottiene:

$$G = \frac{v_{x0}(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 * g * HG})}{g} - X_g$$

Dove

$$HG = H_{torre} + Yg \quad (\text{altezza di lancio})$$

$$\text{Con } Yg = rg \sin \alpha$$

La gittata effettiva sarà pari alla gittata teorica  $G + 2/3L$ .

### 2.3 Calcolo della massima gittata

Nel calcolo della massima gittata sono state utilizzate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno  $a_x = 0$ ,  $a_y = -g$ .
- la velocità periferica  $v_0$  è uguale a 31,40 m/sec.
- Le coordinate del punto di partenza del corpo non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma (0, HG = Htorre + Yg) ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

Si è considerato il caso di rottura per distacco di un aerogeneratore dalle seguenti caratteristiche:

- Diametro Rotore [m] 150
- Altezza del mozzo [m] 105
- Potenza nominale [MW] 5,6
- Velocità rotore nominale[rpm] 12,6
- Velocità di Cut-in [m/s] 3
- Velocità di Cut-out [m/s] 25

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori di  $\theta$ .

Angolo $\alpha$	n	$v_0$	$v_{x0}$	$v_{y0}$	$H_g$	$r_g$	Gittata teorica	$X_g$	$L_g$	Gittata Effettiva
0	12,60	32,99	0,00	32,99	105,00	25,00	-25,00	25,00	50,00	25,00
1	12,60	32,99	0,58	32,98	105,44	25,00	-19,76	25,00	50,00	30,24
2	12,60	32,99	1,15	32,97	105,87	25,00	-14,52	24,98	50,00	35,48
3	12,60	32,99	1,73	32,94	106,31	25,00	-9,26	24,97	50,00	40,74
4	12,60	32,99	2,30	32,91	106,74	25,00	-4,00	24,94	50,00	46,00
5	12,60	32,99	2,87	32,86	107,18	25,00	1,26	24,90	50,00	51,26
6	12,60	32,99	3,45	32,81	107,61	25,00	6,51	24,86	50,00	56,51
7	12,60	32,99	4,02	32,74	108,05	25,00	11,76	24,81	50,00	61,76
8	12,60	32,99	4,59	32,67	108,48	25,00	16,98	24,76	50,00	66,98



9	12,60	32,99	5,16	32,58	108,91	25,00	22,19	24,69	50,00	72,19
10	12,60	32,99	5,73	32,49	109,34	25,00	27,38	24,62	50,00	77,38
11	12,60	32,99	6,29	32,38	109,77	25,00	32,54	24,54	50,00	82,54
12	12,60	32,99	6,86	32,27	110,20	25,00	37,67	24,45	50,00	87,67
13	12,60	32,99	7,42	32,14	110,62	25,00	42,77	24,36	50,00	92,77
14	12,60	32,99	7,98	32,01	111,05	25,00	47,82	24,26	50,00	97,82
15	12,60	32,99	8,54	31,86	111,47	25,00	52,83	24,15	50,00	102,83
16	12,60	32,99	9,09	31,71	111,89	25,00	57,79	24,03	50,00	107,79
17	12,60	32,99	9,64	31,55	112,31	25,00	62,71	23,91	50,00	112,71
18	12,60	32,99	10,19	31,37	112,73	25,00	67,56	23,78	50,00	117,56
19	12,60	32,99	10,74	31,19	113,14	25,00	72,36	23,64	50,00	122,36
20	12,60	32,99	11,28	31,00	113,55	25,00	77,10	23,49	50,00	127,10
21	12,60	32,99	11,82	30,80	113,96	25,00	81,77	23,34	50,00	131,77
22	12,60	32,99	12,36	30,58	114,37	25,00	86,37	23,18	50,00	136,37
23	12,60	32,99	12,89	30,36	114,77	25,00	90,90	23,01	50,00	140,90
24	12,60	32,99	13,42	30,13	115,17	25,00	95,35	22,84	50,00	145,35
25	12,60	32,99	13,94	29,90	115,57	25,00	99,73	22,66	50,00	149,73
26	12,60	32,99	14,46	29,65	115,96	25,00	104,02	22,47	50,00	154,02
27	12,60	32,99	14,98	29,39	116,35	25,00	108,23	22,28	50,00	158,23
28	12,60	32,99	15,49	29,13	116,74	25,00	112,35	22,07	50,00	162,35
29	12,60	32,99	15,99	28,85	117,12	25,00	116,38	21,87	50,00	166,38
30	12,60	32,99	16,49	28,57	117,50	25,00	120,31	21,65	50,00	170,31
31	12,60	32,99	16,99	28,28	117,88	25,00	124,15	21,43	50,00	174,15
32	12,60	32,99	17,48	27,97	118,25	25,00	127,90	21,20	50,00	177,90
33	12,60	32,99	17,97	27,66	118,62	25,00	131,54	20,97	50,00	181,54
34	12,60	32,99	18,45	27,35	118,98	25,00	135,09	20,73	50,00	185,09
35	12,60	32,99	18,92	27,02	119,34	25,00	138,53	20,48	50,00	188,53
36	12,60	32,99	19,39	26,69	119,69	25,00	141,86	20,23	50,00	191,86
37	12,60	32,99	19,85	26,34	120,05	25,00	145,09	19,97	50,00	195,09
38	12,60	32,99	20,31	25,99	120,39	25,00	148,21	19,70	50,00	198,21
39	12,60	32,99	20,76	25,64	120,73	25,00	151,22	19,43	50,00	201,22
40	12,60	32,99	21,20	25,27	121,07	25,00	154,13	19,15	50,00	204,13
41	12,60	32,99	21,64	24,90	121,40	25,00	156,92	18,87	50,00	206,92
42	12,60	32,99	22,07	24,51	121,73	25,00	159,59	18,58	50,00	209,59
43	12,60	32,99	22,50	24,12	122,05	25,00	162,16	18,28	50,00	212,16

44	12,60	32,99	22,91	23,73	122,37	25,00	164,61	17,98	50,00	214,61
45	12,60	32,99	23,33	23,33	122,68	25,00	166,95	17,68	50,00	216,95
46	12,60	32,99	23,73	22,91	122,98	25,00	169,17	17,37	50,00	219,17
47	12,60	32,99	24,12	22,50	123,28	25,00	171,28	17,05	50,00	221,28
48	12,60	32,99	24,51	22,07	123,58	25,00	173,27	16,73	50,00	223,27
49	12,60	32,99	24,90	21,64	123,87	25,00	175,15	16,40	50,00	225,15
50	12,60	32,99	25,27	21,20	124,15	25,00	176,91	16,07	50,00	226,91
51	12,60	32,99	25,64	20,76	124,43	25,00	178,56	15,73	50,00	228,56
52	12,60	32,99	25,99	20,31	124,70	25,00	180,10	15,39	50,00	230,10
53	12,60	32,99	26,34	19,85	124,97	25,00	181,53	15,05	50,00	231,53
54	12,60	32,99	26,69	19,39	125,23	25,00	182,84	14,69	50,00	232,84
55	12,60	32,99	27,02	18,92	125,48	25,00	184,04	14,34	50,00	234,04
56	12,60	32,99	27,35	18,45	125,73	25,00	185,14	13,98	50,00	235,14
57	12,60	32,99	27,66	17,97	125,97	25,00	186,12	13,62	50,00	236,12
58	12,60	32,99	27,97	17,48	126,20	25,00	187,00	13,25	50,00	237,00
59	12,60	32,99	28,28	16,99	126,43	25,00	187,77	12,88	50,00	237,77
60	12,60	32,99	28,57	16,49	126,65	25,00	188,43	12,50	50,00	238,43
61	12,60	32,99	28,85	15,99	126,87	25,00	188,99	12,12	50,00	238,99
62	12,60	32,99	29,13	15,49	127,07	25,00	189,45	11,74	50,00	239,45
63	12,60	32,99	29,39	14,98	127,28	25,00	189,81	11,35	50,00	239,81
64	12,60	32,99	29,65	14,46	127,47	25,00	190,08	10,96	50,00	240,08
65	12,60	32,99	29,90	13,94	127,66	25,00	190,24	10,57	50,00	240,24
66	12,60	32,99	30,13	13,42	127,84	25,00	190,32	10,17	50,00	240,32
67	12,60	32,99	30,36	12,89	128,01	25,00	190,30	9,77	50,00	240,30
68	12,60	32,99	30,58	12,36	128,18	25,00	190,19	9,37	50,00	240,19
69	12,60	32,99	30,80	11,82	128,34	25,00	189,99	8,96	50,00	239,99
70	12,60	32,99	31,00	11,28	128,49	25,00	189,71	8,55	50,00	239,71
71	12,60	32,99	31,19	10,74	128,64	25,00	189,34	8,14	50,00	239,34
72	12,60	32,99	31,37	10,19	128,78	25,00	188,89	7,73	50,00	238,89
73	12,60	32,99	31,55	9,64	128,91	25,00	188,37	7,31	50,00	238,37
74	12,60	32,99	31,71	9,09	129,03	25,00	187,77	6,89	50,00	237,77
75	12,60	32,99	31,86	8,54	129,15	25,00	187,09	6,47	50,00	237,09
76	12,60	32,99	32,01	7,98	129,26	25,00	186,34	6,05	50,00	236,34
77	12,60	32,99	32,14	7,42	129,36	25,00	185,53	5,62	50,00	235,53
78	12,60	32,99	32,27	6,86	129,45	25,00	184,65	5,20	50,00	234,65

79	12,60	32,99	32,38	6,29	129,54	25,00	183,70	4,77	50,00	233,70
80	12,60	32,99	32,49	5,73	129,62	25,00	182,70	4,34	50,00	232,70
81	12,60	32,99	32,58	5,16	129,69	25,00	181,63	3,91	50,00	231,63
82	12,60	32,99	32,67	4,59	129,76	25,00	180,51	3,48	50,00	230,51
83	12,60	32,99	32,74	4,02	129,81	25,00	179,34	3,05	50,00	229,34
84	12,60	32,99	32,81	3,45	129,86	25,00	178,11	2,61	50,00	228,11
85	12,60	32,99	32,86	2,87	129,90	25,00	176,84	2,18	50,00	226,84
86	12,60	32,99	32,91	2,30	129,94	25,00	175,52	1,74	50,00	225,52
87	12,60	32,99	32,94	1,73	129,97	25,00	174,15	1,31	50,00	224,15
88	12,60	32,99	32,97	1,15	129,98	25,00	172,75	0,87	50,00	222,75
89	12,60	32,99	32,98	0,58	130,00	25,00	171,30	0,44	50,00	221,30
90	12,60	32,99	32,99	0,00	130,00	25,00	169,82	0,00	50,00	219,82

Tabella 2 Calcoli gittata massima

Dall'analisi della gittata, si deduce che la massima distanza percorsa dall'elemento si ottiene per un angolo  $\theta$  intorno a  $66^\circ$  con un valore di gittata pari a circa **240,32 metri**.



Figura 2 Massima area di caduta aerogeneratore CA01

Inquadramento massima area di caduta

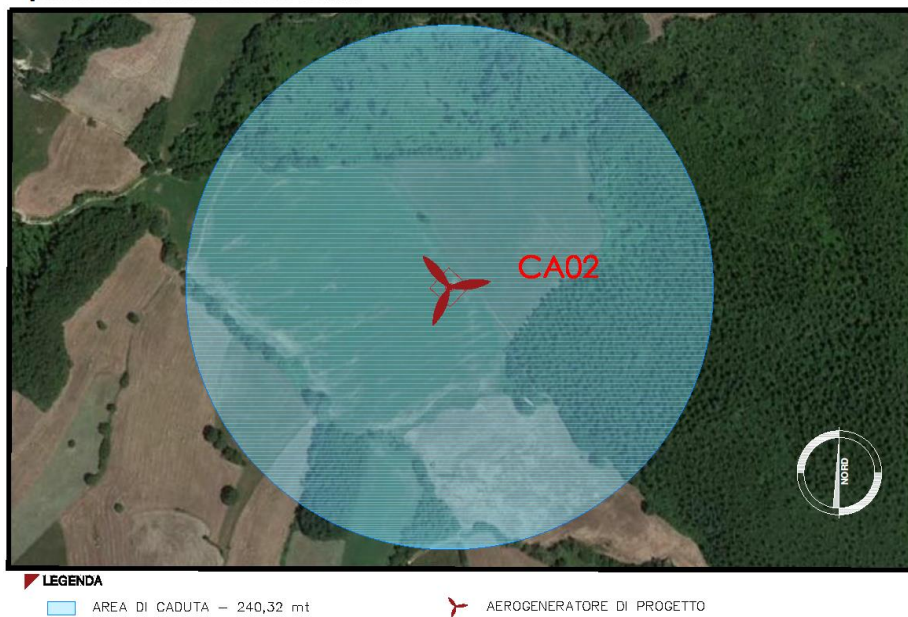


Figura 3 Massima area di caduta aerogeneratore CA02

Inquadramento massima area di caduta

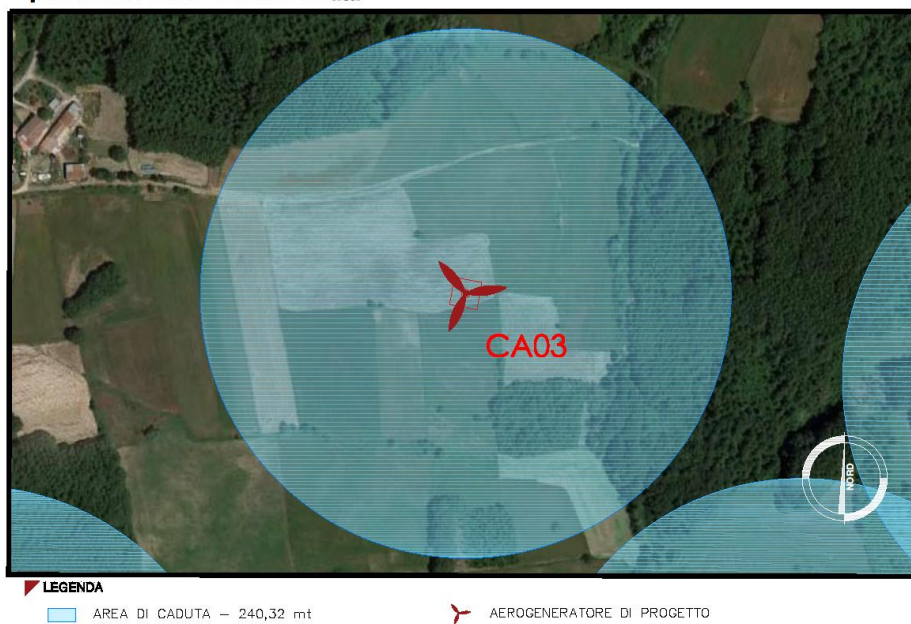


Figura 4 Massima area di caduta aerogeneratore CA03

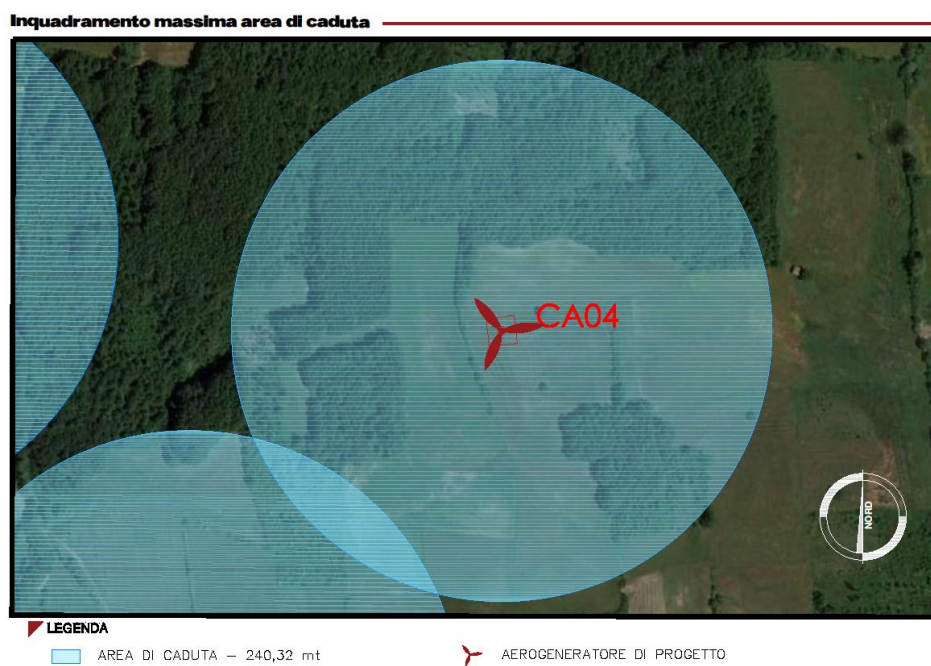


Figura 5 Massima area di caduta aerogeneratore CA04

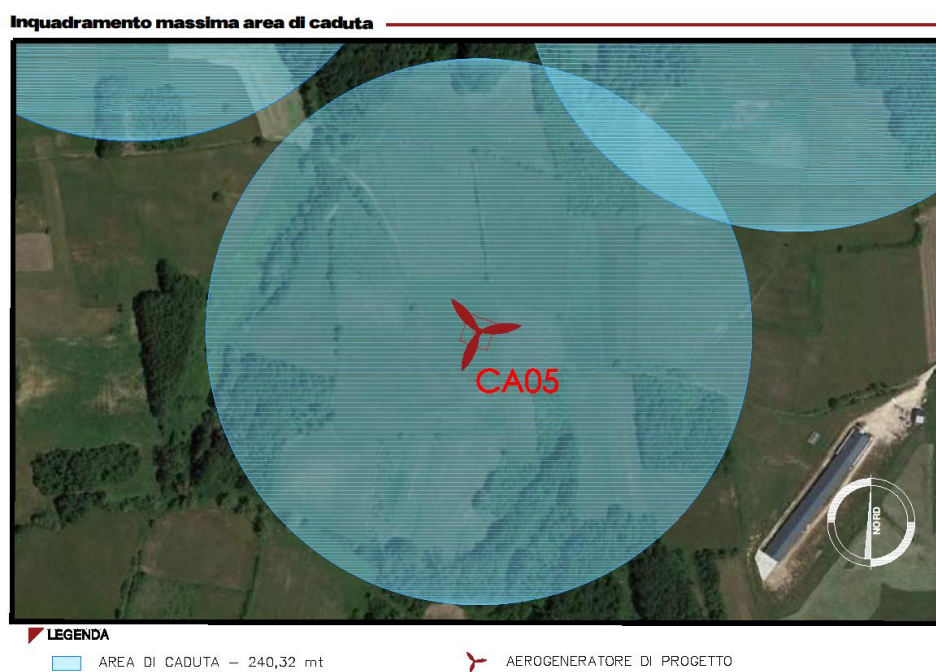


Figura 6 Massima area di caduta aerogeneratore CA05

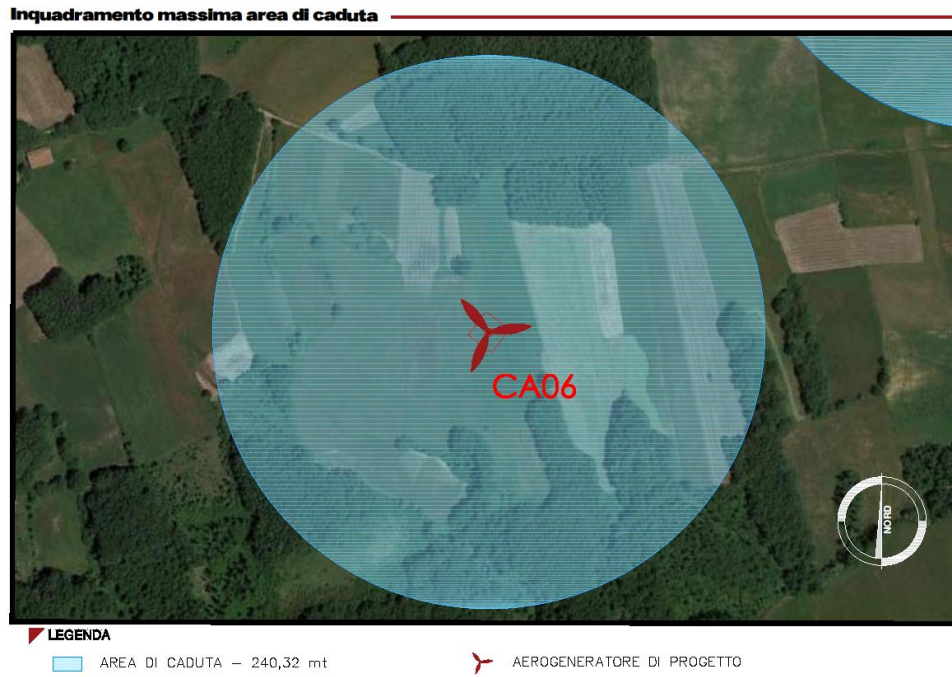


Figura 7 Massima area di caduta aerogeneratore CA06

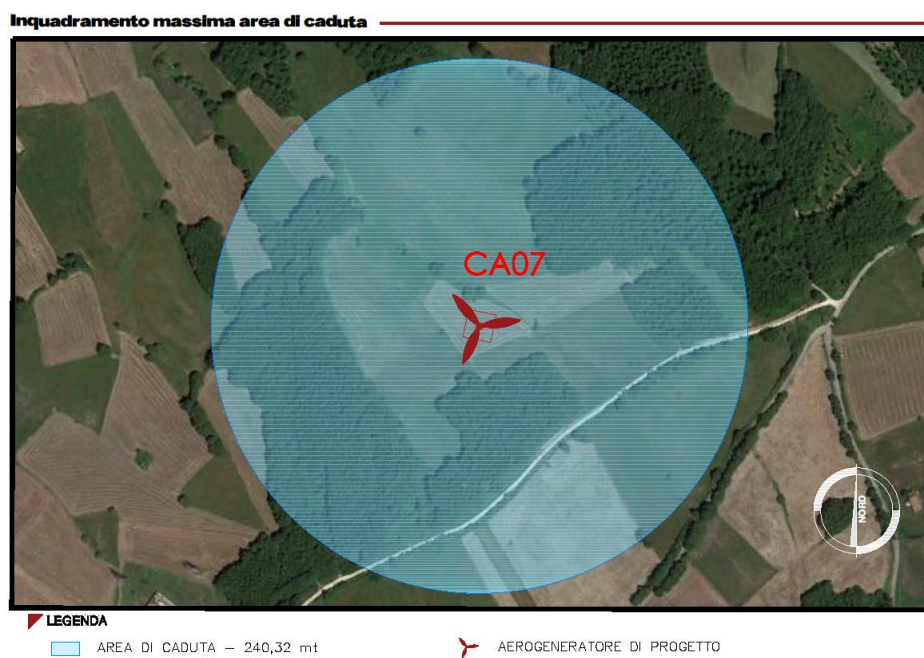


Figura 8 Massima area di caduta aerogeneratore CA07

### 3. Calcolo Della Gittata Massima – distacco frammento di 10 m

Benché il distacco di un frammento di pala sia da considerarsi, per i sistemi di controllo esistenti sulle turbine di nuova generazione, un evento pressoché impossibile, sarà comunque preso in considerazione il calcolo della gittata di un frammento di pala di 10 m (e successivamente di 5 m) considerando questa volta l'attrito viscoso dell'aria prodotto su di esso durante la caduta.

Sottolineiamo che tutte le approssimazioni e semplificazioni proposte precedentemente per il distacco dell'intera pala sono a vantaggio di sicurezza in quanto, non si è tenuto conto delle dissipazioni causate dalle forze viscosse dovute alla resistenza prodotta dall'aria. Se ne terrà invece in conto per il distacco dei frammenti in quanto, le forze di inerzia dovute al movimento dell'oggetto e la risultante delle forze resistenti dovuta all'aria, saranno comparabili e quindi non più trascurabili.

In questo calcolo verrà utilizzata la velocità massima indicata dal costruttore come velocità di rotazione al momento del distacco (12,6 g/min), è evidente che i sofisticati sistemi di controllo non permetterebbero al rotore dell'aerogeneratore di ruotare ad una velocità maggiore di quelle indicate nelle specifiche tecniche.

Le assunzioni del modello sono:

- Si fa riferimento al baricentro del corpo (sulla base di forma e dimensione opportunamente ipotizzate) e si applicano ad esso le equazioni del moto.
- Si assume come velocità iniziale  $V_0$  il vettore applicato nel baricentro al momento del distacco, avente come modulo la velocità tangenziale corrispondente alla massima velocità angolare di esercizio per un raggio pari alla distanza del baricentro dal centro di rotazione e come direzione quella della tangente nello stesso baricentro al moto circolare da esso mantenuto fino al momento del distacco.
- Si determina l'angolo  $\alpha_0$  per il quale la gittata è massima. La definizione di questo valore avviene per tentativi successivi, e dipende essenzialmente dalla geometria del sistema (altezza mozzo, diametro rotore, dimensioni del frammento) e dalla velocità di rotazione al momento del distacco.
- Si tiene conto, nel volo e nella traiettoria del corpo, della spinta generata dal vento in direzione ortogonale al piano del rotore che per convenzione porremo come il piano XZ e che tenderà a spostare il corpo stesso dal piano di rotazione XZ del rotore. La velocità di spinta del vento considerata è quella massima a cui funziona l'aerogeneratore (cut off).
- Il modulo della forza di attrito agente sul frammento in moto libero dopo il distacco è dato dalla formula

$$FD = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times Cd \times A \times V_{xz}$$

Dove:

- $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria che cambia in relazione alla quota altimetrica del sito di installazione degli aerogeneratori ma anche in base alle dimensioni e quindi massime altezze raggiunte dal sistema torre tubolare più rotore. In questo caso è posta pari a 0,898 Kg/m<sup>3</sup>.
- $C_d$  è il coefficiente di attrito ampiamente dipendente delle caratteristiche geometriche della pala. Sulla base di dati riportati in letteratura tale valore è stato assunto pari a 1.
- $A$  è la superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria. Nel caso di un frammento di pala di 10 m, si è considerata una superficie efficace di 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- $V_{xz}$  è il modulo della proiezione del vettore velocità del corpo sul piano XZ misurata con riferimento al baricentro del corpo

Il moto libero di un corpo di massa nota  $M$  sotto l'azione delle forze inerziali di gravità e di resistenza dell'aria è descritto, quindi, dalle seguenti equazioni:

$$a_x = - \frac{1}{M} \times FD \times \cos\alpha$$

$$a_y = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times (w - V_y)^2 / M$$

$$a_z = - \frac{1}{M} \times (FD \times \sin\alpha + M \times g)$$

$$FD = \frac{1}{2} \rho_{aria} \times C_d \times A \times V_{xz}$$

Dove:

- $\alpha$  rappresenta l'arcotangente del rapporto  $V_z / V_x$  e cambia da istante a istante durante il moto libero di caduta;
- $w$  è il modulo della velocità del vento, supposta ortogonale al piano XZ e costante per tutta la durata del moto;
- $V_y$  è il modulo della componente della velocità del corpo avente la stessa direzione del vento;
- $g$  è l'accelerazione di gravità.

Le condizioni al contorno indipendenti sono:

- temperatura ambiente e velocità del vento, impostate nei valori estremi di esercizio come precedentemente esposto;
- altezza del mozzo posta pari a 105 m.
- massa  $M$ , area efficace  $A$ , lunghezza  $L$  posizione del baricentro del corpo distaccato (posta a 1/3 della



lunghezza nel caso dell'intera pala e a 1/2 nel caso di un frammento);

- $\alpha_0$  viene inizializzato al valore arbitrario di  $20^\circ$ , prossimo a valori descritti in letteratura per analoghi esperimenti;
- si pongono ascissa e ordinata del baricentro del corpo al momento del distacco  $X_0=0$  e  $Y_0=0$
- si pone la componente iniziale del vettore velocità in direzione del vento  $V_{y0}=0$ , in quanto tale vettore, nel momento del distacco, è determinato dal solo movimento del rotore che è supposto ortogonale al vento stesso;

La soluzione del sistema di equazioni viene determinata con il metodo di Eulero che è un metodo iterativo per la risoluzione di equazioni differenziali partendo dalle condizioni al contorno. Tale soluzione ci permetterà di definire il moto del corpo distaccato nello spazio tridimensionale rappresentato in un sistema cartesiano ortogonale XYZ, in cui:

- il piano XY rappresenta il piano orizzontale, corrispondente al livello del mare;
- il piano XZ viene fatto coincidere con il piano su cui giace il rotore (ortogonale alla direzione del vento);
- il piano YZ viene fissato, ortogonalmente agli altri due piani coordinati, facendo coincidere l'origine del sistema con la proiezione sul piano XY del baricentro del corpo nell'istante del distacco.

Con questa rappresentazione geometrica è evidente che al momento della definizione della gittata massima si dovrà tenere in conto della lunghezza del corpo in caduta, ma anche della geometria del modello. Ora, poiché la gittata è calcolata a partire dal mozzo, dovrà essere calcolata la distanza tra mozzo e punto di caduta del baricentro del corpo distaccato.

Nel punto di caduta si dovrà tenere poi in conto della lunghezza del frammento o della pala. I parametri fisici e geometrici che sia assumeranno saranno i seguenti:

- $M= 803$  kg in relazioni alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo. (si è ipotizzato un peso di 21700kg distribuito per 2/3 nella prima metà di pala e per 1/3 nella metà finale).
- Altezza mozzo  $Q_t= 105$  m, diametro rotore 150 m, lunghezza pala 75 m, lunghezza frammento 10 m, velocità di rotazione 12,6 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- $C_d = 1$ , sulla base di dati riportati in letteratura.
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 5 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene la gittata massima. Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0= 20^\circ$ .
- Densità dell'aria  $\rho= 0,898$  kg/m<sup>3</sup>, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200

m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è **Gmax= 291,16 m** con tempo di permanenza in volo di 9,86 secondi circa.

#### 4. Calcolo Della Gittata Massima – Distacco Frammento 5 m

Di seguito si riporta il valore della gittata massima nel caso di un frammento di lunghezza pari a 5 m.

I parametri fisici e geometrici che si assumeranno saranno i seguenti:

- $M= 401$  kg in relazione alle caratteristiche geometriche della pala, come frazione del suo peso complessivo
- Altezza mozzo  $H_t= 105$  m, diametro rotore 150 m, lunghezza pala 75 m, lunghezza frammento 5 m, velocità di rotazione 12,6 giri/min (velocità massima consentita per il tipo di aerogeneratore).
- $C_d = 1$ , sulla base di dati riportati in letteratura
- A superficie efficace che la pala oppone alla resistenza generata dall'aria, si assume pari a 5,8 mq sulla base delle caratteristiche geometriche della pala e del frammento e del moto rotazionale complesso a cui il frammento è sottoposto.
- Si è proceduto per tentativi al fine di definire l'angolo  $\alpha_0$  a cui avviene la gittata massima. Nel caso in esame il risultato è stato  $\alpha_0= 11^\circ$ .
- Densità dell'aria  $\rho= 0,898$  kg/m<sup>3</sup>, pari alla densità dell'aria con temperatura di 40°C alla quota di 200 m s.l.m. (valori limite che determina la condizione più sfavorevole nel calcolo).

Il valore della gittata massima ottenuto dal calcolo è **Gmax= 286,72 m** con tempo di permanenza in volo di 9,98 secondi circa.

#### 5. Probabilità di accadimento

Il processo di rottura di un aerogeneratore è un evento raro, risultato di una catena di eventi, la cui probabilità totale è data dalla combinazione delle probabilità dei meccanismi intermedi, attraverso i quali si giunge al risultato finale. Ogni evento individuale della catena è visto con le sue conseguenze in modo che il prodotto della probabilità di occasione di ogni individuale evento fornisce la relativa probabilità di danno. Questo valore può essere messo in relazione con il valore di soglia, che dipende dall'oggetto individuale da proteggere. La relazione, che traduce il concetto ora esposto, si basa sulla seguente disuguaglianza.

$$P_{so} > P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4$$

- $P_{so}$  è il valore di soglia relativo all'oggetto da difendere;
- $P_1$  è la probabilità di occasione dell'evento incidentale accaduto alla turbina eolica;
- $P_2$  è la probabilità di occasione dell'urto tra l'oggetto da proteggere e la pala;
- $P_3$  è la probabilità di occasione della condizione di vento sfavorevole o dei condizionamenti ambientali;
- $P_4$  la probabilità di occasione relativa ad altre cause, come tolleranze di costruzione, etc.

In conclusione, in relazione al rischio di rottura, si riportano le risultanze del documento “Analysis Of Risk Involved Incidents Of Wind Turbines”, allegato alla “Guide for Risk-Based Zoning of Wind Turbines”, elaborato nel 2005 dall'ECN (Energy Research Centre of the Netherlands) sulla base dei dati relativi a produzione di energia eolica, incidenti e manutenzione raccolti dallo ISET (Institut für Solare Energieversorgungstechnik) in Germania e dall'EMD (Energie- og Miljødata) in Danimarca. L'ECN ha analizzato le informazioni di incidenti registrate su un campione molto largo di turbine eoliche in Danimarca e Germania, determinando le frequenze di:

- rottura di una pala;
- rottura della punta e di piccole parti;
- rottura della torre alla base;
- caduta del rotore o della navicella;
- caduta di piccole parti dal rotore o dalla navicella.

La probabilità di rottura della pala è stata suddivisa in diverse condizioni d'uso:

- alla velocità nominale;
- durante la frenata meccanica;
- in condizione di overspeed.

I risultati dell'analisi, riportati nella tabella sottostante, mostrano come la probabilità di rottura della pala sia pari a circa 0,00084%. Per quanto riguarda la probabilità di rottura in overspeed, è stata utilizzata la stima di studi precedenti, determinata moltiplicando la probabilità di guasto della rete elettrica (5 volta in un anno) con la probabilità di rottura del primo sistema di frenata ( $10^{-3}$  per intervento) e del secondo sistema di frenata ( $10^{-3}$  per intervento) e per la probabilità di rottura della pala in queste condizioni (100%).

Part	Failure frequency per turbine per year			Maximum throw distance [m] (reported and confirmed)
	Expected Value	95% upper limit	Recommended Risk Analysis Value [1/yr]	
Entire blade	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	$8.4 \cdot 10^{-4}$	150
Nominal rpm			$4.2 \cdot 10^{-4}$	
Mechanical braking			$4.2 \cdot 10^{-4}$	
Overspeed			$5.0 \cdot 10^{-6}$	
Tip or piece of blade	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$	500
Tower	$5.8 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	Shaft height + half diameter
Nacelle and/or rotor	$2.0 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$3.2 \cdot 10^{-4}$	Half diameter
Small parts from nacelle	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$1.7 \cdot 10^{-3}$	Half diameter

Tabella 3 frequenza di accadimento rottura aerogeneratore

## 6. Conclusioni

La distanza massima raggiunta dalla pala nell'ipotesi accidentale di cedimento dell'attacco bullonato blade-mozzo, e quindi della pala che si rompe a seguito di un evento eccezionale, è di **240,32 metri**.

Dal momento che sono stati considerati per ciascun parametro valori ampiamente conservativi e mettendosi nelle condizioni di esercizio più gravose (massima velocità di rotazione, massima velocità del vento), il valore della gittata calcolato si può considerare ampiamente conservativo, pertanto da considerarsi quale Gittata Massima.

Così come indicato nella Delibera della Giunta Regionale n°533 del 04/10/16 al fine di tutelare la pubblica e privata incolumità, in caso di rottura accidentale degli organi rotanti, va considerata la massima distanza raggiunta da:

- Strade comunali urbane ed extraurbane;
- Ciglio sinistro e destro del Regio Tratturo;
- Unità abitative munite di abitabilità regolarmente censite;
- Centri abitati.

Si precisa che nessuno di tali elementi è posizionato ad una distanza inferiore a quello della massima gittata.

- La strada comunale più prossima all'impianto si trova ad una distanza di circa 300m. la massima gittata degli aerogeneratori CA01, CA02, CA03, CA05, CA06 e CA07 interessa solamente dei sentieri non asfaltati. Tale viabilità non rientra nella categoria di strada urbana o extraurbana così come definito dal Codice della strada. Le strade in questione risultano essere, infatti, nel caso del tratto viario interessato dall'aerogeneratore CA07 una strada locale non asfaltata, negli altri casi sentieri di campagna utilizzate dai mezzi agricoli. Gli assi viari considerati sono privi degli elementi necessari per essere classificati come strade comunali extraurbane di categoria B o C. Secondo il codice della strada le strade comunali sono classificate nelle seguenti tipologie:

**Strade extraurbane principali di tipo B:** *“strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico invalicabile, ciascuna con almeno due corsie di marcia e banchine pavimentate, priva di intersezioni a raso, con accessi alle proprietà laterali coordinati, contraddistinta dagli appositi segnali di inizio e fine, riservata alla circolazione di talune categorie di veicoli a motore; per eventuali altre categorie di utenti devono essere previsti opportuni spazi. Per la sosta devono essere previste apposite aree con accessi dotati di corsie di decelerazione e di accelerazione.”*

**Strade extraurbane secondarie di tipo C:** *“strada ad unica carreggiata con almeno una corsia per senso di marcia e banchine”.*

**Strade di scorrimento veloci e Strade urbane di scorrimento di tipo D:** *“strada a carreggiate indipendenti o separate da spartitraffico, ciascuna con almeno due corsie di marcia, ed una eventuale corsia riservata ai mezzi pubblici, banchine pavimentate e marciapiedi, con eventuali intersezioni a raso semaforizzate; per la sosta sono previste apposite aree o fasce laterali estranee alla carreggiata, entrambe con immissioni ed uscite concentrate”*

**Strade interquartiere e Strade urbane di quartiere di tipo E:** *“strada ad unica carreggiata con almeno due corsie, banchine pavimentate e marciapiedi; per la sosta sono previste aree attrezzate con apposita corsia di manovra, esterna alla carreggiata.”*

**Strade locali zonali e Strade locali di tipo F:** *“strada urbana od extraurbana opportunamente sistemata non facente parte degli altri tipi di strade”.* Sono quindi strade locali (cat. F) le strade urbane di quartiere (cat. E) o strade extraurbane secondarie (cat. C) per le quali mancano uno o più requisiti per poterle classificare come tali. Ad esempio, nel caso di strade extraurbane secondarie l'assenza delle banchine laterali o della larghezza minima della carreggiata o nel caso di strade urbane di quartiere l'assenza dei marciapiedi.

Da quanto riportato dal codice della strada è chiaro che le strade in questione non possono essere classificate né come strada urbana né tantomeno come strada extraurbana. Nella tavola in allegato sono riportate le caratteristiche nel dettaglio ed il report fotografico a supporto dell'indagine effettuata.

Di seguito si riporta lo stato della viabilità in questione.



Figura 9 Sentiero interessato dalla gittata dell'aerogeneratore CA01



Figura 10 Sentiero interessato dalla gittata dell'aerogeneratore CA02



**Figura 11** Sentiero interessato dalla gittata dell'aerogeneratore CA03



**Figura 12** Sentiero interessato dalla gittata dell'aerogeneratore CA05



**Figura 13** Sentiero interessato dalla gittata dell'aerogeneratore CA06



**Figura 14** Strada locale interessata dalla gittata dell'aerogeneratore CA07

- Il Regio Tratturo si trova a circa 6,5 km dall'aerogeneratore più vicino;
- Le prime abitazioni si trovano a circa 380 m nel caso dell'aerogeneratore più vicino.
- Il centro abitato più vicino è quello di Colle Sannita ubicato a circa 1600 m dall'aerogeneratore più vicino.



**Essendo tutti gli elementi sopracitati ad una distanza maggiore della massima gittata, risulta verificata la sicurezza nel caso di rottura degli elementi rotanti.**

Il calcolo è stato poi eseguito risolvendo le stesse equazioni nel caso in cui il distacco fosse riferito a frammenti di pala, benché tale evento è da considerarsi pressoché impossibile.

Lunghezza frammento/ Pala intera (m)	5	10
Peso frammento (kg)	401	803
Coefficiente di forma	1	1
Superficie efficace di resistenza al moto (mq)*	5,8	11
Angolo di gittata max ottenuto per tentativi (gradi)	10	11
Tempo di volo (sec)	9,98	9,86
<b>Gittata massima (m)</b>	<b>286,72</b>	<b>291,16</b>

La gittata dipende dal peso del frammento e dalla sua superficie efficace di resistenza al moto. Non è detto che un frammento più piccolo abbia una gittata maggiore. Nei casi calcolati il frammento di 10 m va più lontano di quello di 5 m. Anche nel caso peggiore, la gittata si mantiene al di sotto dei 300 m e rispetto agli aerogeneratori non esistono edifici sensibili, per cui anche in questo caso **risulta verificata la sicurezza nel caso di rottura degli elementi rotanti.**

A supporto del presente studio, si riporta il calcolo della gittata effettuato dalla società Vestas, società leader nella realizzazione e nella distribuzione di turbine eoliche. Lo studio della società Vestas è anch'esso basato sull'ipotesi del distacco di una pala nel caso del cedimento dell'attacco blade-mozzo, mentre la macchina è in funzione. Lo studio è svolto su diversi aerogeneratori realizzati dalla casa costruttrice, e dimostra come varia la gittata in funzione della velocità del rotore, dell'altezza dell'aerogeneratore, della lunghezza della pala, ma soprattutto della tipologia della stessa.

Nello studio, la società affronta due casistiche, quella reale e quella ideale. Il caso reale differisce del 20% dal caso ideale, posto a vantaggio di sicurezza. Ciò significa che, nel caso remoto di distacco dell'intera pala, la distanza della gittata nel caso reale risulterebbe inferiore del 20% rispetto al caso ideale.

Per eccesso di zelo, sono stati confrontati i risultati della gittata massima del presente studio con quelli realizzati da VESTAS. Il modello messo a confronto, con quello in progetto, è l'aerogeneratore V126 della potenza di 3,3 MW, avente una lunghezza massima di 61.6 m e un'altezza massima di 180 m. Tale aerogeneratore viene preso in riferimento perché avente dimensioni superiori a quelle della V150, oggetto del presente calcolo. Dal confronto, emerge che il valore della gittata massima calcolata è pari a 240,32 m e pertanto superiore a quello riportato nello studio VESTAS, pari a 137m. Questo a dimostrazione che il calcolo effettuato considera l'ipotesi più gravosa.

**In aggiunta, secondo quanto riportato nello studio di Vestas, tali valori potrebbero ridursi ulteriormente del 20% se si considerasse il caso reale.**