

IMPIANTO DI PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTE EOLICA
"SAN PANCRAZIO TORREVECCHIA" DI POTENZA PARI A 34,50 MW

REGIONE PUGLIA
PROVINCIA di BRINDISI

COMUNE di SAN PANCRAZIO SALENTINO

Località: Masserie Corte Finocchio, Torre Vecchia e Campone

OPERE DI CONNESSIONE NEI COMUNI DI: San Pancrazio S. (BR) Erchie (BR) ed Avetrana (TA)

PROGETTO DEFINITIVO
Id AU H4QPRN5

Tav.:

Titolo:

R30

GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI
PER ROTTURA ACCIDENTALE

Scala:

Formato Stampa:

Codice Identificatore Elaborato

N.A.

A4

H4QPRN5_DocumentazioneSpecialistica_30

Committente:

STC S.r.l.



Via V. M. STAMPACCHIA, 48 - 73100 Lecce
Tel. +39 0832 1798355
studiocalcarella@gmail.com - fabio.calcarella@gmail.com

Direttore Tecnico: Dott. Ing. Fabio CALCARELLA



Fabio Calcarella

TOZZIgreen

Via Brigata Ebraica, 50 - 48123 Mezzano (RA)
Tel. +39 0544 525311 - Fax +39 0544 525319
pec: tozzi.re@legalmail.it - www.tozziholding.com

Data	Motivo della revisione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:
16 febbraio 2018	Prima emissione	STC	FC	TOZZI GREEN S.p.a.

Sommario

1. PREMESSA.....	2
2. AEROGENERATORE DI PROGETTO	2
3. RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE	2
4. GITTATA-ANALISI TEORICA	3
Traiettoria del frammento	3
Tempo di volo.....	4
Distanza percorsa	4
5. MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO – STUDIO VESTAS	4
6. CALCOLO DELLA GITTATA	7

1. PREMESSA

La presente relazione è parte della documentazione di progetto che la società Tozzigreen S.p.a. ha elaborato per la realizzazione e l'esercizio di un impianto eolico di potenza pari a 34,50 MW, costituito da 10 aerogeneratori in agro del Comune di San Pancrazio Salentino (BR).

2. AEROGENERATORE DI PROGETTO

L'impianto sarà costituito da 10 unità di produzione. Ciascun aerogeneratore sarà tripala ad asse orizzontale costituito da una torre tubolare metallica a tronco di cono alta 132 m e con un diametro di base di circa 4,5 m. In cima alla torre troverà alloggio la navicella cui è collegato il rotore di diametro pari a 136 m, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 200 m (TIP). La velocità del rotore sarà variabile e compresa nel range 5,6-15,3 giri/minuto.

3. RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, al fine della sicurezza, la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio è dovuto alla caduta di oggetti dall'alto, queste cadute possono essere dovute:

- a pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- a rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto e le caratteristiche climatiche, la sua probabilità si può considerare trascurabile.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia è bene evidenziare che:

- il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala;
- le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche: l'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi ad annullare la probabilità di distacco di parti meccaniche in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato);

- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;
- gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo).

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).

Pertanto può affermarsi che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.

4. GITTATA-ANALISI TEORICA

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a "giavelotto" del frammento.

Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavelotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala/ frammento di pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

Traiettoria del frammento

La traiettoria iniziale della pala/sezione di pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze ed ai momenti di inerzia.

Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione di pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

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.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

Distanza percorsa

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.

5. MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO – STUDIO VESTAS

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto “a giavellotto” sono da escludersi data la complessità aerodinamica della pala, il suo peso (oltre 2 t) e la presenza dell'azione del vento.

Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello “*Complex Rotational Motion*”, che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .

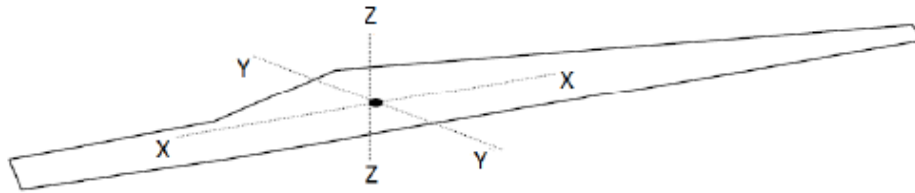


Fig.1 Rappresentazione degli assi di rotazione

La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano.

La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente *out of plane* sulla pala/sezione di pala. In particolare si genera:

- un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/ frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di *flapwise*, *edgewise* e *pitchwise*.

Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy .

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Di questi parametri si tiene sostanzialmente conto nello studio eseguito dalla PB Power Ltd per conto della società Vestas Wind System "VESTAS V80 – Blade throw calculation under normal operating conditions" (2001).

Tale studio ha preso in considerazione due aerogeneratori, aventi caratteristiche diverse:

- aerogeneratore TIPO 1: ha una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 rpm posto su una torre di altezza pari a 67 m
- aerogeneratore TIPO 2: ha una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 rpm posto su una torre di altezza pari a 80 m.

Per la prima tipologia di aerogeneratore è stato fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni:

- 1) la prima, più conservativa, include solo le forze di inerzia ed esclude le forze viscosse;
- 2) la seconda include le forze viscosse;
- 3) la terza considera il moto della pala completo (moto rotazionale complesso).

La velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala:

- per l'aerogeneratore di TIPO 1 pari a 20 giri/min
- per l'aerogeneratore di TIPO 2 pari a 16,39 giri/min

In sintesi i risultati ottenuti sono i seguenti:

- aerogeneratore di TIPO 1 moto rotazionale complesso (condizione 3) la gittata pari a circa 110 m,
- aerogeneratore di TIPO 1 moto considerando gli effetti delle forze viscosse (condizione 2) la gittata pari a circa 113 m
- aerogeneratore di TIPO 1, caso semplificato che non tiene in conto la complessità del moto e gli effetti delle forze viscosse 131,6 m

Per l'aerogeneratore di TIPO 2 è stato effettuato solo il calcolo nella condizione 1, escludendo le forze viscosse e non considerando la complessità del moto, ottenendo un valore di 108 m.

Possiamo pertanto concludere che:

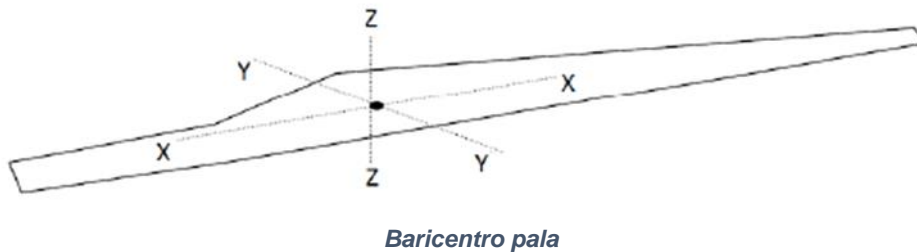
- se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione. Infatti l'aerogeneratore di TIPO 2 (h torre 80 m, pala 44 m), pur essendo più alto e con rotore più grande rispetto a quello di TIPO 1 (h torre 67 m, pala 39 m) ha una gittata massima teorica minore di quella dell'aerogeneratore di TIPO 1 (108 m < 131,6 m).

Nel paragrafo successivo effettueremo il calcolo della gittata per l'aerogeneratore in progetto, considerando solo parametri geometrici e cinematici e non l'effettivo moto rotazionale complesso, e pertanto otterremo **valori della gittata sicuramente superiori** rispetto a quelli reali.

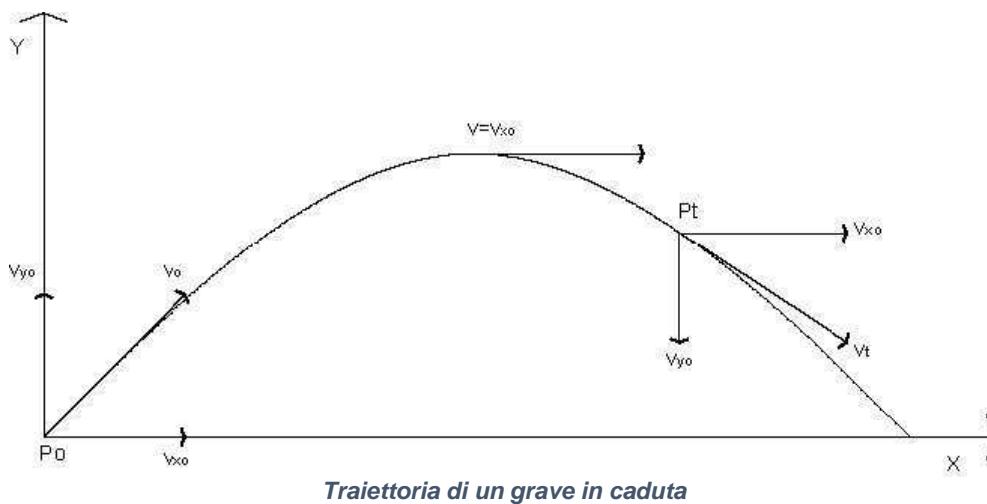
6. CALCOLO DELLA GITTATA

Il calcolo della gittata è stato effettuato considerando soltanto i parametri cinematici e geometrici, in particolare considerando:

- H altezza mozzo = 132 m
- Lunghezza pala = 66,7 m
- $n = 15,3$ giri/ min è la velocità di rotazione massima
- $r_g = 22,23$ m raggio baricentro, valore ottenuto assumendo che, in relazione alle caratteristiche della pala e la distribuzione dei pesi, il baricentro sia ad $1/3$ rispetto alla lunghezza della pala.
- θ è l'angolo, rispetto all'orizzontale a cui avviene il distacco
- $H_g = H + Y_g$, dove $Y_g = R_g \sin\theta$, indica la distanza (lungo l'asse y) del baricentro della pala rispetto al mozzo al momento del distacco
- $v_g = 35,62$ m/s è la velocità del baricentro della pala, ottenuta dalla formula $v_g = (2\pi n/60) r_g$
- $v_{x0} = v_g \cos\theta$, è la velocità lungo l'asse x
- $v_{y0} = v_g \sin\theta$, è la velocità lungo l'asse y



Considerando la tipica traiettoria parabolica di un grave in caduta



e le equazioni del moto corrispondente, considerando che il moto lungo l'asse x è rettilineo uniforme e lungo l'asse y è uniformemente accelerato, abbiamo:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{0x} & x &= x_0 + v_{0x}t \\ v_y &= gt + v_{0y} & y &= \frac{1}{2}gt^2 + v_{0y}t + y_0 \end{aligned}$$

dove ovviamente g è l'accelerazione di gravità e t il tempo del moto.

Applicando queste formule e risolvendo l'equazione del moto, con una serie di passaggi si perviene alla formula di calcolo della gittata massima.

$$\text{Gittata}_{\max} = v_{x0} \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4 \left(\frac{1}{2}g \cdot H_G \right)}}{g}$$

E' evidente che v_{x0} , v_{y0} ed H_g dipendono dall'angolo θ , a cui avviene il distacco della pala e pertanto tale valore sarà calcolato per valori di θ che variano da 0° (pala in orizzontale) a 90° (pala in verticale, con massima estensione in altezza).

Al valore della gittata calcolato con questa formula andrà sommata la distanza X_g del baricentro della pala rispetto all'asse della torre al momento del distacco ($X_g = r_g \cos \theta$) e la distanza del vertice della pala dal baricentro $L_g = 44,47$ m.

Nella tabella seguente sono indicati i valori della gittata massima al variare dell'angolo θ .

Angolo θ	Vx	Vy	Hg	Gittata teorica	Xg	Lg	Gittata effettiva
0	35,62	0,00	132,00	184,80	22,23	44,47	251,50
1	35,62	0,62	132,13	187,10	22,23	44,47	253,80
2	35,60	1,24	132,26	189,32	22,22	44,47	256,01
3	35,57	1,86	132,39	191,45	22,20	44,47	258,12
4	35,54	2,48	132,52	193,49	22,18	44,47	260,13
5	35,49	3,10	132,65	195,43	22,15	44,47	262,05
6	35,43	3,72	132,77	197,28	22,11	44,47	263,86
7	35,36	4,34	132,90	199,03	22,07	44,47	265,56
8	35,28	4,96	133,03	200,67	22,02	44,47	267,15
9	35,18	5,57	133,16	202,21	21,96	44,47	268,64
10	35,08	6,19	133,29	203,65	21,90	44,47	270,01
11	34,97	6,80	133,41	204,98	21,82	44,47	271,27
12	34,84	7,41	133,54	206,20	21,75	44,47	272,42
13	34,71	8,01	133,67	207,31	21,66	44,47	273,44
14	34,56	8,62	133,79	208,31	21,57	44,47	274,35
15	34,41	9,22	133,92	209,20	21,48	44,47	275,14
16	34,24	9,82	134,04	209,97	21,37	44,47	275,81
17	34,07	10,42	134,17	210,62	21,26	44,47	276,35
18	33,88	11,01	134,29	211,16	21,15	44,47	276,77
19	33,68	11,60	134,41	211,58	21,02	44,47	277,07
20	33,47	12,18	134,53	211,88	20,89	44,47	277,24
21	33,26	12,77	134,66	212,07	20,76	44,47	277,29
22	33,03	13,34	134,78	212,13	20,61	44,47	277,21
23	32,79	13,92	134,90	212,07	20,47	44,47	277,01
24	32,54	14,49	135,01	211,90	20,31	44,47	276,67
25	32,28	15,05	135,13	211,60	20,15	44,47	276,21
26	32,02	15,62	135,25	211,18	19,98	44,47	275,63
27	31,74	16,17	135,36	210,64	19,81	44,47	274,92
28	31,45	16,72	135,48	209,98	19,63	44,47	274,08
29	31,16	17,27	135,59	209,20	19,45	44,47	273,12
30	30,85	17,81	135,71	208,31	19,25	44,47	272,03
31	30,53	18,35	135,82	207,29	19,06	44,47	270,81
32	30,21	18,88	135,93	206,16	18,85	44,47	269,48
33	29,88	19,40	136,04	204,90	18,65	44,47	268,02
34	29,53	19,92	136,14	203,54	18,43	44,47	266,43
35	29,18	20,43	136,25	202,05	18,21	44,47	264,73
36	28,82	20,94	136,36	200,45	17,99	44,47	262,91
37	28,45	21,44	136,46	198,74	17,76	44,47	260,97
38	28,07	21,93	136,56	196,92	17,52	44,47	258,91
39	27,68	22,42	136,66	194,99	17,28	44,47	256,73
40	27,29	22,90	136,76	192,95	17,03	44,47	254,44
41	26,88	23,37	136,86	190,80	16,78	44,47	252,04
42	26,47	23,84	136,96	188,54	16,52	44,47	249,53
43	26,05	24,29	137,05	186,18	16,26	44,47	246,91
44	25,62	24,75	137,15	183,73	15,99	44,47	244,18
45	25,19	25,19	137,24	181,17	15,72	44,47	241,35

46	24,75	25,62	137,33	178,51	15,44	44,47	238,42
47	24,29	26,05	137,42	175,75	15,16	44,47	235,38
48	23,84	26,47	137,51	172,91	14,88	44,47	232,25
49	23,37	26,88	137,59	169,97	14,59	44,47	229,02
50	22,90	27,29	137,68	166,94	14,29	44,47	225,70
51	22,42	27,68	137,76	163,82	13,99	44,47	222,28
52	21,93	28,07	137,84	160,63	13,69	44,47	218,78
53	21,44	28,45	137,92	157,34	13,38	44,47	215,19
54	20,94	28,82	138,00	153,98	13,07	44,47	211,52
55	20,43	29,18	138,07	150,54	12,75	44,47	207,76
56	19,92	29,53	138,14	147,03	12,43	44,47	203,93
57	19,40	29,88	138,22	143,44	12,11	44,47	200,02
58	18,88	30,21	138,28	139,78	11,78	44,47	196,03
59	18,35	30,53	138,35	136,06	11,45	44,47	191,98
60	17,81	30,85	138,42	132,27	11,12	44,47	187,85
61	17,27	31,16	138,48	128,42	10,78	44,47	183,66
62	16,72	31,45	138,54	124,50	10,44	44,47	179,41
63	16,17	31,74	138,60	120,54	10,09	44,47	175,10
64	15,62	32,02	138,66	116,51	9,75	44,47	170,72
65	15,05	32,28	138,72	112,43	9,40	44,47	166,30
66	14,49	32,54	138,77	108,31	9,04	44,47	161,82
67	13,92	32,79	138,82	104,13	8,69	44,47	157,29
68	13,34	33,03	138,87	99,91	8,33	44,47	152,71
69	12,77	33,26	138,92	95,65	7,97	44,47	148,08
70	12,18	33,47	138,96	91,34	7,60	44,47	143,42
71	11,60	33,68	139,01	87,00	7,24	44,47	138,71
72	11,01	33,88	139,05	82,62	6,87	44,47	133,96
73	10,42	34,07	139,09	78,21	6,50	44,47	129,18
74	9,82	34,24	139,12	73,77	6,13	44,47	124,36
75	9,22	34,41	139,16	69,30	5,75	44,47	119,52
76	8,62	34,56	139,19	64,80	5,38	44,47	114,64
77	8,01	34,71	139,22	60,27	5,00	44,47	109,74
78	7,41	34,84	139,25	55,72	4,62	44,47	104,81
79	6,80	34,97	139,27	51,15	4,24	44,47	99,86
80	6,19	35,08	139,30	46,56	3,86	44,47	94,89
81	5,57	35,18	139,32	41,95	3,48	44,47	89,90
82	4,96	35,28	139,34	37,33	3,09	44,47	84,89
83	4,34	35,36	139,36	32,69	2,71	44,47	79,87
84	3,72	35,43	139,37	28,05	2,32	44,47	74,84
85	3,10	35,49	139,38	23,39	1,94	44,47	69,79
86	2,48	35,54	139,39	18,72	1,55	44,47	64,74
87	1,86	35,57	139,40	14,05	1,16	44,47	59,68
88	1,24	35,60	139,41	9,37	0,78	44,47	54,61
89	0,62	35,62	139,41	4,68	0,39	44,47	49,54
90	0,00	35,62	139,41	0,00	0,00	44,47	44,47

Dalla tabella si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo si ha con l'angolo $\theta= 21^\circ$, per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa 277,29 m dal centro della torre tubolare. Sottolineiamo ancora che questo valore è teorico ed altamente conservativo, poiché non tiene in conto le forze di attrito viscoso e la complessità del moto rotazionale, ovvero la rotazione della pala durante il moto di caduta, condizioni reali che attenuano i valori della gittata massima.

Questi dati e queste considerazioni teoriche, peraltro sembrano suffragati dall'esperienza reale:

- il distacco della pala è un evento che si è verificato molto raramente;
- nel caso in cui si sono verificati distacchi è stato verificato che il moto è di tipo rotazionale complesso e la distanza di volo è sempre ben al di sotto dei risultati ottenuti dai calcoli matematici;
- le parti che hanno subito distacchi a causa di eventi estremi, come fulminazioni, sono state rinvenute a non più di 40 - 50 m dalla base della torre eolica per aerogeneratori con diametro del rotore pari a 80 m.