

COMUNE DI LUCERA

PROVINCIA DI FOGGIA



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN PARCO EOLICO

RICHIESTA DI AUTORIZZAZIONE UNICA

D.Lgs. 387/2003

PROCEDIMENTO UNICO AMBIENTALE (PUA)

Valutazione di

Impatto Ambientale (V.I.A.)

D.Lgs. 152/2006 ss.mm.ii. (art. 27)

"Norme in materia ambientale"

PROGETTO

LUCERIA

DITTA

ATS Engineering s.r.l.

A16

Pagg. 16

Titolo dell'allegato:

CALCOLO SULLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

1	EMISSIONE	05/02/2021
		DATA

CARATTERISTICHE GENERALI D'IMPIANTO

GENERATORE - Altezza mozzo: fino a 140 m
Diametro rotore: fino a 180 m
Potenza unitaria: fino a 6 MW

IMPIANTO - Numero generatori: 33
Potenza complessiva: fino a 198 MW

Il proponente:

ATS Engineering s.r.l.
P.zza Giovanni Paolo II, 8
71017 Torremaggiore (FG)
0882/393197
atseng@pec.it

Il progettista:

ATS Engineering srl
P.zza Giovanni Paolo II, 8
71017 Torremaggiore (FG)
0882/393197
atseng@pec.it

Il tecnico:

Ing. Eugenio Di Gianvito
atsing@atsing.eu

Sommario

PREMESSA.....	2
INTRODUZIONE	2
CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE.....	2
INQUADRAMENTO DEL SISTEMA	3
SPECIFICHE TECNICHE DI UN AEROGENERATORE avente:	4
STUDIO DEL PROBLEMA	4
CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI	5
<i>Caso 1 - Distacco dell'intera pala (lunghezza: 70 metri)</i>	6
<i>Caso 2 - Distacco di un pezzo di estremità della pala (lunghezza: 5 metri)</i>	11
CONCLUSIONI	16

PREMESSA

Con riferimento al Decreto Ministeriale 10 settembre 2010 e alle Regole per la Sicurezza è necessaria la “dimostrazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale” (art.10 comma g).

Questo documento riporta lo studio realizzato per la dimostrazione della gittata massima della pala, con riferimento alla tecnologia utilizzata nel progetto del parco eolico “*Luceria*” previsto nel comune di Lucera (FG).

L'impianto sarà composto da 33 aerogeneratori con potenza fino a 6.0 MW. La potenza complessiva prodotta dall'impianto potrà arrivare fino a 198 MW. L'impianto verrà allacciato alla rete di distribuzione MT con tensione nominale di 30 KV mediante cabina primaria BT/MT, secondo quanto disposto dalla società ENEL.

Le torri prese in considerazione per il parco eolico “*Luceria*” avranno altezza al mozzo fino a 140 m e diametro rotore fino a 180 m, a titolo di esempio lo studio che segue prende in considerazione un aerogeneratore di altezza 140 m e diametro rotore 140 m; tali considerazioni sono da ritenersi di carattere generale e applicabili a qualsiasi aerogeneratore avente stessa potenza e dimensioni.

INTRODUZIONE

La gittata è la distanza longitudinale percorsa da un corpo lanciato in aria, con una certa direzione e con una certa velocità iniziale, prima di impattare con il suolo.

Lo studio viene effettuato applicando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e considerando tutti i possibili effetti meccanici ed aerodinamici che possono in qualche modo influenzare la distanza di gittata della pala.

CENNI SUI PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Nel dettaglio, le pale sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore; il mozzo, a sua volta, è collegato ad un primo albero di trasmissione, detto albero lento, che ruota alla stessa velocità angolare del rotore.

L'albero lento è, nella maggior parte dei casi, collegato ad un moltiplicatore di giri, da cui si diparte un albero veloce, che ruota con velocità angolare data da quella dell'albero lento per il rapporto di trasmissione del rotismo installato. Tutti i componenti sopra menzionati, ad eccezione del rotore e del mozzo, sono ubicati entro una cabina detta navicella, la quale a sua volta è sistemata su un supporto cuscinetto in maniera da essere facilmente orientata secondo la direzione del vento.

Oltre ai componenti su elencati vi è un sistema di controllo che regola la velocità di rotazione del rotore, agendo sull'angolo di attacco delle pale, e che modifica l'orientamento della navicella (controllo dell'imbardata) al fine di allineare la macchina rispetto alla direzione del vento. Si riporta di seguito una figura che evidenzia il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento che causa tale moto. La conformazione del profilo alare dell'aerogeneratore è fissa, mentre è mobile il rotore sul quale sono ancorate le pale. Questo garantisce la possibilità di poter sempre orientare il rotore rispetto al vento al fine di avere un verso orario di rotazione, indipendentemente dalla direzione del vento. Questa considerazione ci serve per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale ed a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano. Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva e quindi si capisce la direzione lungo la quale l'eventuale pala o parte di essa che si distacca percorre il suo moto.

INQUADRAMENTO DEL SISTEMA

Il sistema di riferimento adottato per lo studio del problema è costituito da una terna sinistrorsa X , Y , Z , dalle seguenti caratteristiche:

- nel piano XY giace l'aerogeneratore, con base nell'origine del sistema;
- il rotore gira in senso orario;
- la direzione del vento è perpendicolare al piano XY , quindi parallela all'asse delle z .

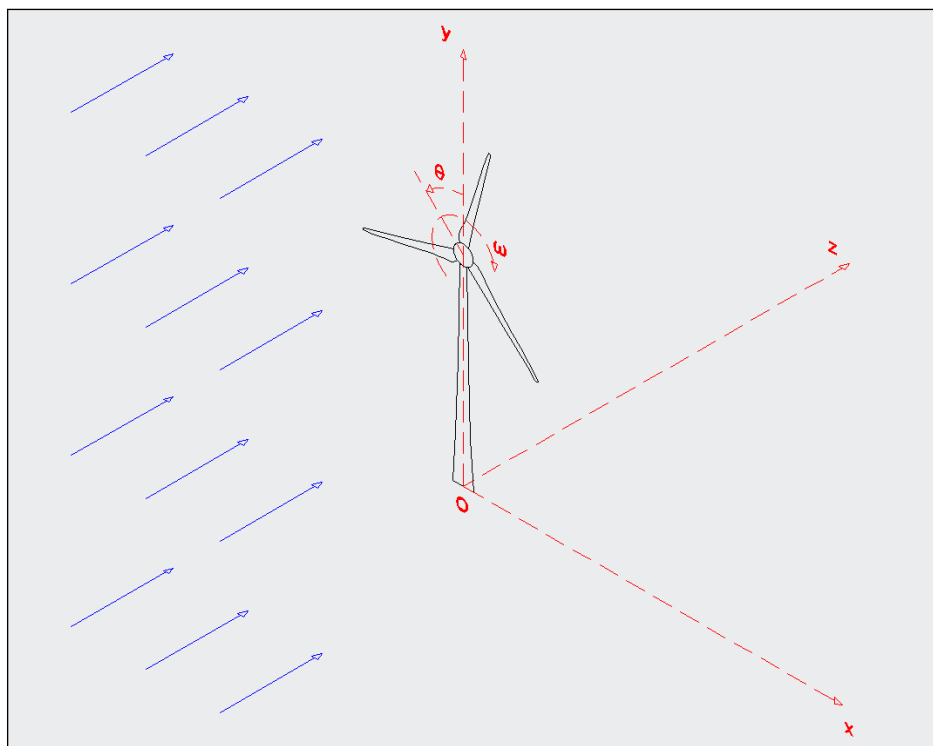


Figura 1: Riferimento del sistema

SPECIFICHE TECNICHE DI UN AEROGENERATORE avente:

Diametro Rotore [m]	140
Altezza del mozzo [m]	140
Potenza nominale [MW]	6
Velocità rotore [rpm]	4,4 –16
Velocità di Cut-in [m/s]	3
Velocità di Cut-out [m/s]	34,0

STUDIO DEL PROBLEMA

Per il calcolo della gittata massima sono state prese in considerazione le caratteristiche di vento più gravose in cui potrebbe avvenire una rottura accidentale, nonché i fattori aerodinamici e le caratteristiche meccaniche degli elementi che costituiscono l'aerogeneratore.

Gli episodi più critici potrebbero verificarsi quando la velocità del vento è massima, un istante prima che il sistema frenante automatico entri in funzione (Cut-out = 34 m/s, al quale corrisponde una velocità angolare del rotore pari a 16 giri al minuto), in una delle seguenti ipotesi:

- distacco dell'intera pala;
- distacco di una parte di essa (estremità della pala, di lunghezza pari a 5 metri, definita attraverso sezioni di pre-rottura appositamente create dal costruttore dell'aerogeneratore).

Nel primo caso il centro di massa del pezzo, per via della geometria della pala, è situato ad $1/3$ della sua lunghezza a partire dal centro del rotore, mentre nel secondo caso si assume che il baricentro del pezzo sia situato nel mezzo della sua lunghezza (ipotesi semplificativa a vantaggio di sicurezza).

L'oggetto che accidentalmente si distacca dal rotore viene messo in moto a causa dell'annullamento della forza centripeta, con una velocità iniziale v_0 applicata nel suo baricentro, la cui direzione coincide con la tangente alla traiettoria disegnata dall'oggetto durante il suo consueto movimento (prima della rottura); tale v_0 è quindi proporzionale alla velocità di rotazione del rotore e alla distanza tra il centro del rotore ed il centro di massa dell'oggetto stesso, mentre l'angolo nel quale si trova la pala al momento della rottura determina le rispettive proiezioni di v_0 sull'asse delle x e su quello delle y .

Siccome il sistema è immerso nel campo gravitazionale terrestre l'oggetto è anche soggetto ad una accelerazione costante $g=9,81\text{m/s}^2$ diretta lungo $-y$.

Al moto dell'oggetto inoltre si oppone la forza di resistenza dell'aria, che è proporzionale al coefficiente di forma dell'oggetto, alla densità dell'aria, al quadrato della velocità dell'oggetto in volo, e alla superficie di riferimento dell'oggetto:

$$R_a = 0,5 \cdot c_x \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S$$

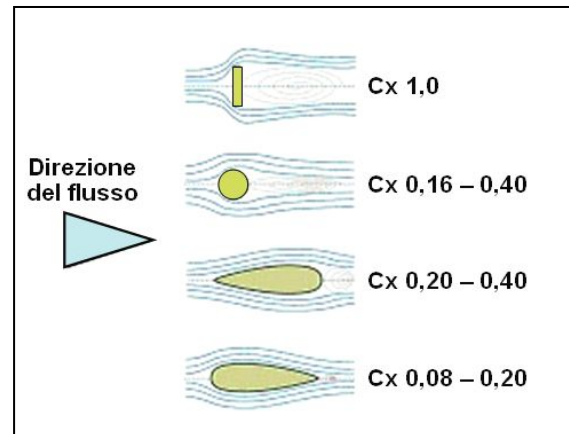
Infine sull'oggetto in volo agisce la forza del vento parallela all'asse delle z:

$$R_a = 0,5 \cdot c_{x2} \cdot \rho \cdot w_s^2 \cdot S_2$$

identica nella forma all'equazione della forza di resistenza dell'aria, ma diretta trasversalmente al moto iniziale di gittata, con c_{x2} e S_2 pari al coefficiente di forma ed alla superficie di riferimento secondo un flusso diretto parallelamente all'asse delle z, e con w_s pari alla velocità del vento che impatta sull'oggetto, e che varia in base alla quota in cui esso si trova.

È importante considerare che:

- entrambi i coefficienti di forma non rimangono costanti durante tutto l'intervallo di tempo t ma cambiano rapidamente e ripetutamente a causa delle roto-traslazioni che l'oggetto subisce durante il volo e per via della svergolatura delle pale, assumendo valori compresi tra 0,08 e 1;



- la gittata massima non viene calcolata secondo la sola posizione finale del baricentro dell'oggetto, ma tiene anche conto della lunghezza più gravosa della rimanente parte di frammento;
- per questioni legate alla funzionalità ed alla producibilità dell'impianto, gli aerogeneratori sono dotati di sistemi anticongelamento che evitano la formazione di blocchi di ghiaccio lungo le pale quando essi sono in funzione, pertanto l'ipotesi di distacco di un pezzo di ghiaccio viene esclusa a priori.

CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

Sulla base delle considerazioni sopra esposte si è proceduto con il calcolo della gittata massima nei 2 casi critici.

Caso 1 - Distacco dell'intera pala (lunghezza: 70 metri)

Si considerano i seguenti dati:

Velocità del vento, al momento della rottura:

$$w_s = 34 \text{ m/s}$$

Velocità angolare massima del rotore, al momento della rottura:

$$\omega = 16 \text{ giri/minuto}$$

Altezza al mozzo dell'aerogeneratore:

$$H = 140 \text{ m}$$

Distanza tra il centro del rotore ed il baricentro della pala:

$$D = 23,333 \text{ m}$$

Velocità tangenziale:

$$v_0 = 39,09 \text{ m/s}$$

Densità dell'aria:

$$\rho = 1,23 \text{ Kg/m}^3$$

Coefficiente di forma:

$$c_x = \text{variabile } (0,08 \div 1)$$

Superficie di riferimento:

$$S = 300 \text{ m}^2$$

Di seguito si riportano i valori di calcolo della gittata relativa al primo quadrante, con θ compreso tra 0 e 90°, nel quale si verifica la condizione di gittata massima:

θ	x_0	y_0	v_x	v_y	t	Gittata
°	m	m	m/s	m/s	s	m
0	0,00	163,33	39,09	0,00	5,7706	166,299
1	-0,41	163,33	39,09	0,68	5,8405	166,8504
2	-0,81	163,32	39,07	1,36	5,9111	167,4045
3	-1,22	163,30	39,04	2,05	5,9823	167,9623
4	-1,63	163,28	39,00	2,73	6,0542	168,5245
5	-2,03	163,24	38,95	3,41	6,1268	169,0921

6	-2,44	163,21	38,88	4,09	6,1999	169,6658
7	-2,84	163,16	38,80	4,76	6,2736	170,2464
8	-3,25	163,11	38,71	5,44	6,3478	170,8347
9	-3,65	163,05	38,61	6,12	6,4225	171,4315
10	-4,05	162,98	38,50	6,79	6,4977	172,0376
11	-4,45	162,90	38,38	7,46	6,5733	172,6536
12	-4,85	162,82	38,24	8,13	6,6494	173,2802
13	-5,25	162,73	38,09	8,79	6,7258	173,918
14	-5,64	162,64	37,93	9,46	6,8026	174,5677
15	-6,04	162,54	37,76	10,12	6,8796	175,2297
16	-6,43	162,43	37,58	10,78	6,9569	175,9046
17	-6,82	162,31	37,39	11,43	7,0345	176,5927
18	-7,21	162,19	37,18	12,08	7,1122	177,2944
19	-7,60	162,06	36,96	12,73	7,1901	178,01
20	-7,98	161,93	36,74	13,37	7,2681	178,7397
21	-8,36	161,78	36,50	14,01	7,3462	179,4837
22	-8,74	161,63	36,25	14,65	7,4243	180,242
23	-9,12	161,48	35,99	15,28	7,5024	181,0146
24	-9,49	161,32	35,71	15,90	7,5804	181,8013
25	-9,86	161,15	35,43	16,52	7,6583	182,6021
26	-10,23	160,97	35,14	17,14	7,7361	183,4166
27	-10,59	160,79	34,83	17,75	7,8138	184,2444
28	-10,95	160,60	34,52	18,35	7,8911	185,0851
29	-11,31	160,41	34,19	18,95	7,9683	185,9382
30	-11,67	160,21	33,86	19,55	8,0451	186,8029

31	-12,02	160,00	33,51	20,14	8,1215	187,6786
32	-12,36	159,79	33,15	20,72	8,1976	188,5643
33	-12,71	159,57	32,79	21,29	8,2732	189,4592
34	-13,05	159,34	32,41	21,86	8,3483	190,3622
35	-13,38	159,11	32,02	22,42	8,4229	191,2721
36	-13,71	158,88	31,63	22,98	8,4969	192,1879
37	-14,04	158,63	31,22	23,53	8,5703	193,1081
38	-14,37	158,39	30,81	24,07	8,6431	194,0314
39	-14,68	158,13	30,38	24,60	8,7151	194,9563
40	-15,00	157,87	29,95	25,13	8,7865	195,8812
41	-15,31	157,61	29,51	25,65	8,8570	196,8044
42	-15,61	157,34	29,05	26,16	8,9267	197,7242
43	-15,91	157,06	28,59	26,66	8,9955	198,6389
44	-16,21	156,78	28,12	27,16	9,0634	199,5465
45	-16,50	156,50	27,64	27,64	9,1304	200,445
46	-16,78	156,21	27,16	28,12	9,1964	201,3324
47	-17,06	155,91	26,66	28,59	9,2614	202,2067
48	-17,34	155,61	26,16	29,05	9,3253	203,0657
49	-17,61	155,31	25,65	29,51	9,3880	203,9072
50	-17,87	155,00	25,13	29,95	9,4497	204,7288
51	-18,13	154,68	24,60	30,38	9,5102	205,5284
52	-18,39	154,37	24,07	30,81	9,5695	206,3035
53	-18,63	154,04	23,53	31,22	9,6275	207,0519
54	-18,88	153,71	22,98	31,63	9,6842	207,7709
55	-19,11	153,38	22,42	32,02	9,7396	208,4584

56	-19,34	153,05	21,86	32,41	9,7937	209,1117
57	-19,57	152,71	21,29	32,79	9,8464	209,7285
58	-19,79	152,36	20,72	33,15	9,8977	210,3063
59	-20,00	152,02	20,14	33,51	9,9475	210,8428
60	-20,21	151,67	19,55	33,86	9,9959	211,3356
61	-20,41	151,31	18,95	34,19	10,0428	211,7825
62	-20,60	150,95	18,35	34,52	10,0881	212,1811
63	-20,79	150,59	17,75	34,83	10,1319	212,5295
64	-20,97	150,23	17,14	35,14	10,1741	212,8256
65	-21,15	149,86	16,52	35,43	10,2147	213,0677
66	-21,32	149,49	15,90	35,71	10,2536	213,2543
67	-21,48	149,12	15,28	35,99	10,2909	213,384
68	-21,63	148,74	14,65	36,25	10,3266	213,4558
69	-21,78	148,36	14,01	36,50	10,3605	213,4692
70	-21,93	147,98	13,37	36,74	10,3927	213,424
71	-22,06	147,60	12,73	36,96	10,4231	213,3205
72	-22,19	147,21	12,08	37,18	10,4518	213,1599
73	-22,31	146,82	11,43	37,39	10,4787	212,9438
74	-22,43	146,43	10,78	37,58	10,5038	212,675
75	-22,54	146,04	10,12	37,76	10,5271	212,357
76	-22,64	145,64	9,46	37,93	10,5485	211,9948
77	-22,73	145,25	8,79	38,09	10,5682	211,5944
78	-22,82	144,85	8,13	38,24	10,5859	211,1636
79	-22,90	144,45	7,46	38,38	10,6018	210,7121
80	-22,98	144,05	6,79	38,50	10,6158	210,2513

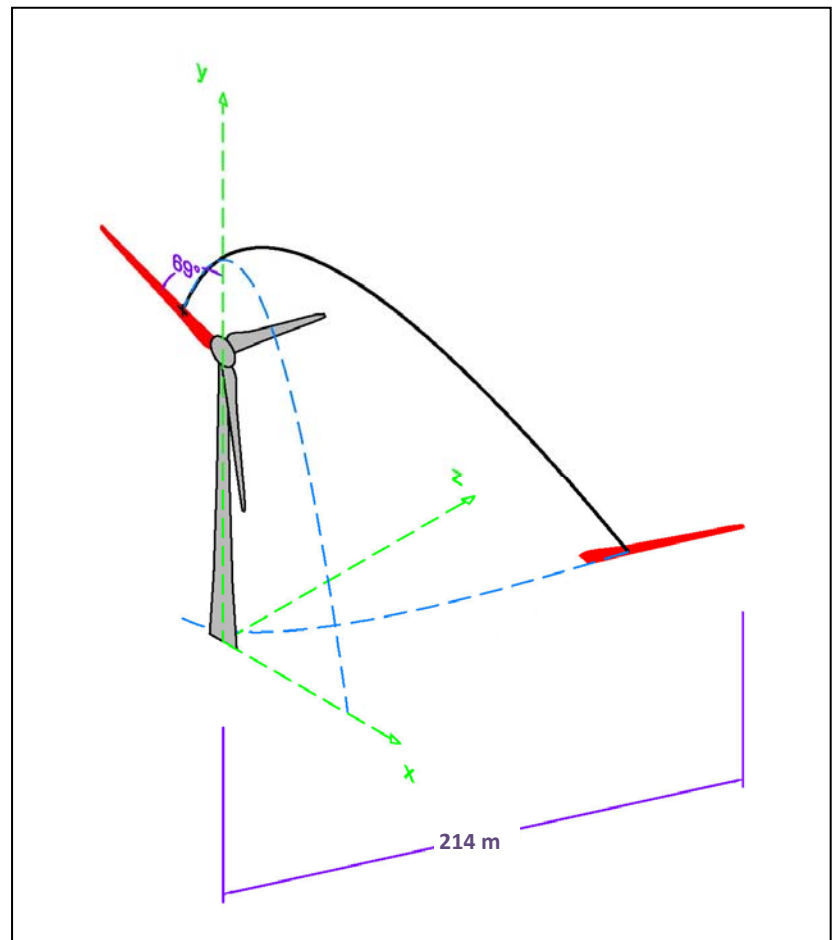
81	-23,05	143,65	6,12	38,61	10,6279	209,7951
82	-23,11	143,25	5,44	38,71	10,6381	209,3598
83	-23,16	142,84	4,76	38,80	10,6464	208,9647
84	-23,21	142,44	4,09	38,88	10,6528	208,6321
85	-23,24	142,03	3,41	38,95	10,6572	208,3875
86	-23,28	141,63	2,73	39,00	10,6597	208,26
87	-23,30	141,22	2,05	39,04	10,6603	-208,282
88	-23,32	140,81	1,36	39,07	10,6589	-208,491
89	-23,33	140,41	0,68	39,09	10,6556	-208,926
90	-23,33	140,00	0,00	39,09	10,6503	-209,63

Gittata massima:

$$L_{max} = 213,47 \text{ m}$$

Angolo zenitale di gittata massima:

$$\theta = 69^\circ$$



Caso 2 - Distacco di un pezzo di estremità della pala (lunghezza: 5 metri)

Si considerano i seguenti dati:

Velocità del vento, al momento della rottura:

$$w_s = 34 \text{ m/s}$$

Velocità angolare massima del rotore, al momento della rottura:

$$\omega = 16 \text{ giri/minuto}$$

Altezza al mozzo dell'aerogeneratore:

$$H = 140 \text{ m}$$

Distanza tra il centro del rotore ed il baricentro della pala:

$$D = 67,5 \text{ m}$$

Velocità tangenziale:

$$v_0 = 113,10 \text{ m/s}$$

Densità dell'aria:

$$\rho = 1,23 \text{ Kg/m}^3$$

Coefficiente di forma:

$$c_x = \text{variabile } (0,08 \div 1)$$

Superficie di riferimento:

$$S = 10 \text{ m}^2$$

Di seguito si riportano i valori di calcolo della gittata relativa al primo quadrante, con θ compreso tra 0 e 90°, nel quale si verifica la condizione di gittata massima:

θ	x_0	y_0	v_x	v_y	t	Gittata
°	m	m	m/s	m/s	s	m
0	0,00	207,50	113,10	0,00	6,5041	201,0141
1	-1,18	207,49	113,08	1,97	6,7083	200,5141
2	-2,36	207,46	113,03	3,95	6,9183	199,9738
3	-3,53	207,41	112,94	5,92	7,1340	199,3983
4	-4,71	207,34	112,82	7,89	7,3553	198,793
5	-5,88	207,24	112,67	9,86	7,5821	198,1631

6	-7,06	207,13	112,48	11,82	7,8142	197,5144
7	-8,23	207,00	112,25	13,78	8,0515	196,8526
8	-9,39	206,84	112,00	15,74	8,2936	196,1835
9	-10,56	206,67	111,70	17,69	8,5405	195,5128
10	-11,72	206,47	111,38	19,64	8,7918	194,8464
11	-12,88	206,26	111,02	21,58	9,0474	194,1902
12	-14,03	206,02	110,63	23,51	9,3070	193,5498
13	-15,18	205,77	110,20	25,44	9,5703	192,9309
14	-16,33	205,49	109,74	27,36	9,8370	192,3391
15	-17,47	205,20	109,24	29,27	10,1070	191,7798
16	-18,61	204,89	108,72	31,17	10,3798	191,2584
17	-19,74	204,55	108,16	33,07	10,6552	190,78
18	-20,86	204,20	107,56	34,95	10,9330	190,3498
19	-21,98	203,82	106,94	36,82	11,2128	189,9724
20	-23,09	203,43	106,28	38,68	11,4943	189,6527
21	-24,19	203,02	105,59	40,53	11,7774	189,3949
22	-25,29	202,58	104,86	42,37	12,0617	189,2033
23	-26,37	202,13	104,11	44,19	12,3470	189,0819
24	-27,45	201,66	103,32	46,00	12,6329	189,0343
25	-28,53	201,18	102,50	47,80	12,9192	189,0638
26	-29,59	200,67	101,65	49,58	13,2057	189,1736
27	-30,64	200,14	100,77	51,35	13,4922	189,3663
28	-31,69	199,60	99,86	53,10	13,7783	189,6443
29	-32,72	199,04	98,92	54,83	14,0638	190,0096
30	-33,75	198,46	97,95	56,55	14,3486	190,4637

31	-34,77	197,86	96,94	58,25	14,6323	191,0078
32	-35,77	197,24	95,91	59,93	14,9148	191,6426
33	-36,76	196,61	94,85	61,60	15,1958	192,3685
34	-37,75	195,96	93,76	63,24	15,4752	193,1854
35	-38,72	195,29	92,64	64,87	15,7528	194,0927
36	-39,68	194,61	91,50	66,48	16,0282	195,0894
37	-40,62	193,91	90,32	68,06	16,3015	196,1742
38	-41,56	193,19	89,12	69,63	16,5723	197,3452
39	-42,48	192,46	87,89	71,17	16,8405	198,6002
40	-43,39	191,71	86,64	72,70	17,1059	199,9366
41	-44,28	190,94	85,36	74,20	17,3684	201,3515
42	-45,17	190,16	84,05	75,68	17,6278	202,8415
43	-46,03	189,37	82,71	77,13	17,8840	204,403
44	-46,89	188,56	81,36	78,56	18,1367	206,032
45	-47,73	187,73	79,97	79,97	18,3858	207,7244
46	-48,56	186,89	78,56	81,36	18,6313	209,4756
47	-49,37	186,03	77,13	82,71	18,8729	211,281
48	-50,16	185,17	75,68	84,05	19,1105	213,1356
49	-50,94	184,28	74,20	85,36	19,3440	215,0344
50	-51,71	183,39	72,70	86,64	19,5733	216,9721
51	-52,46	182,48	71,17	87,89	19,7982	218,9434
52	-53,19	181,56	69,63	89,12	20,0186	220,9428
53	-53,91	180,62	68,06	90,32	20,2345	222,9647
54	-54,61	179,68	66,48	91,50	20,4456	225,0035
55	-55,29	178,72	64,87	92,64	20,6519	227,0533

56	-55,96	177,75	63,24	93,76	20,8533	229,1084
57	-56,61	176,76	61,60	94,85	21,0497	231,1628
58	-57,24	175,77	59,93	95,91	21,2410	233,2107
59	-57,86	174,77	58,25	96,94	21,4270	235,246
60	-58,46	173,75	56,55	97,95	21,6078	237,2626
61	-59,04	172,72	54,83	98,92	21,7832	239,2542
62	-59,60	171,69	53,10	99,86	21,9531	241,2143
63	-60,14	170,64	51,35	100,77	22,1174	243,1364
64	-60,67	169,59	49,58	101,65	22,2761	245,0136
65	-61,18	168,53	47,80	102,50	22,4291	246,8384
66	-61,66	167,45	46,00	103,32	22,5763	248,6033
67	-62,13	166,37	44,19	104,11	22,7177	250,2996
68	-62,58	165,29	42,37	104,86	22,8531	251,9181
69	-63,02	164,19	40,53	105,59	22,9826	253,4484
70	-63,43	163,09	38,68	106,28	23,1060	254,8787
71	-63,82	161,98	36,82	106,94	23,2233	256,1955
72	-64,20	160,86	34,95	107,56	23,3345	257,3829
73	-64,55	159,74	33,07	108,16	23,4394	258,4222
74	-64,89	158,61	31,17	108,72	23,5381	259,291
75	-65,20	157,47	29,27	109,24	23,6305	259,9627
76	-65,49	156,33	27,36	109,74	23,7165	260,4052
77	-65,77	155,18	25,44	110,20	23,7961	260,5802
78	-66,02	154,03	23,51	110,63	23,8693	260,442
79	-66,26	152,88	21,58	111,02	23,9361	259,9374
80	-66,47	151,72	19,64	111,38	23,9963	259,0054

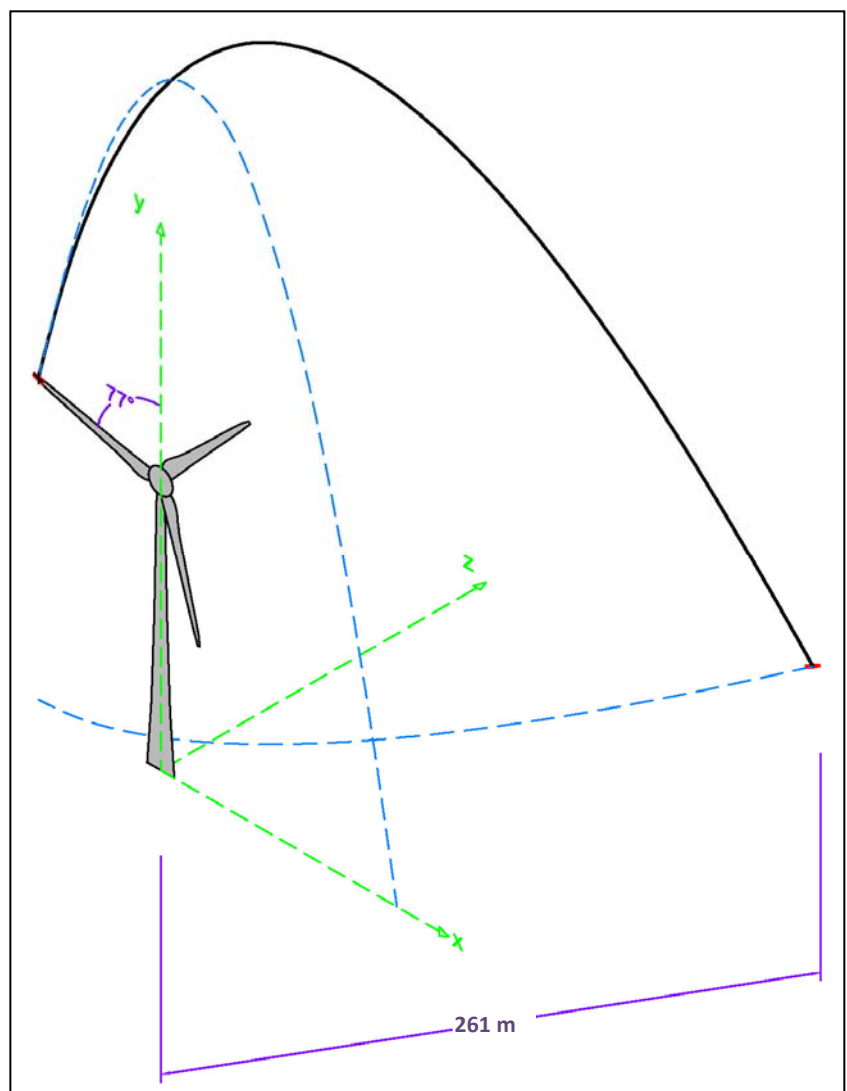
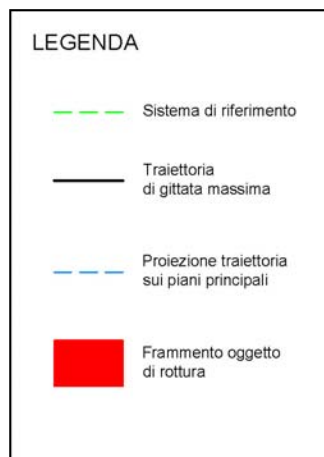
81	-66,67	150,56	17,69	111,70	24,0500	257,58
82	-66,84	149,39	15,74	112,00	24,0971	255,5955
83	-67,00	148,23	13,78	112,25	24,1377	252,9994
84	-67,13	147,06	11,82	112,48	24,1716	249,7775
85	-67,24	145,88	9,86	112,67	24,1989	246,0019
86	-67,34	144,71	7,89	112,82	24,2195	241,9196
87	-67,41	143,53	5,92	112,94	24,2335	238,1074
88	-67,46	142,36	3,95	113,03	24,2408	235,7277
89	-67,49	141,18	1,97	113,08	24,2414	-236,893
90	-67,50	140,00	0,00	113,10	24,2353	-245,036

Gittata massima:

$$L_{max} = 260,58 \text{ m}$$

Angolo zenitale:

$$\theta = 77^\circ$$



CONCLUSIONI

In conclusione, in caso di rottura accidentale, le condizioni più gravose sono rappresentate dall'ipotesi 2, ovvero dal distacco di un frammento di estremità della pala, di lunghezza pari a 5 m.

In tal caso si ottiene la gittata massima pari a 261 m, con un angolo di lancio $\theta = 77^\circ$.