



COMUNE DI CERIGNOLA

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

ALPHA 6

DITTA

ATS Engineering s.r.l.

A17

Pagg. 16

Titolo dell'allegato:

CALCOLO SULLA GITATTA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

| | | |
|---|-----------|------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| 1 | EMISSIONE | 26/01/2021 |
| | | 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: 11
Potenza complessiva: fino a 66 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..... | 6 |
| <i>Caso 1 - Distacco dell'intera pala (lunghezza: 70 metri).....</i> | <i>6</i> |
| <i>Caso 2 - Distacco di un pezzo di estremità della pala (lunghezza: 5 metri).....</i> | <i>11</i> |
| 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 “Alpha 6” previsto nel Comune di Cerignola (FG).

L'impianto sarà composto da 11 aerogeneratori con potenza fino a 6.0 MW. La potenza complessiva prodotta dall'impianto potrà arrivare fino a 66 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 Alpha 6 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 .

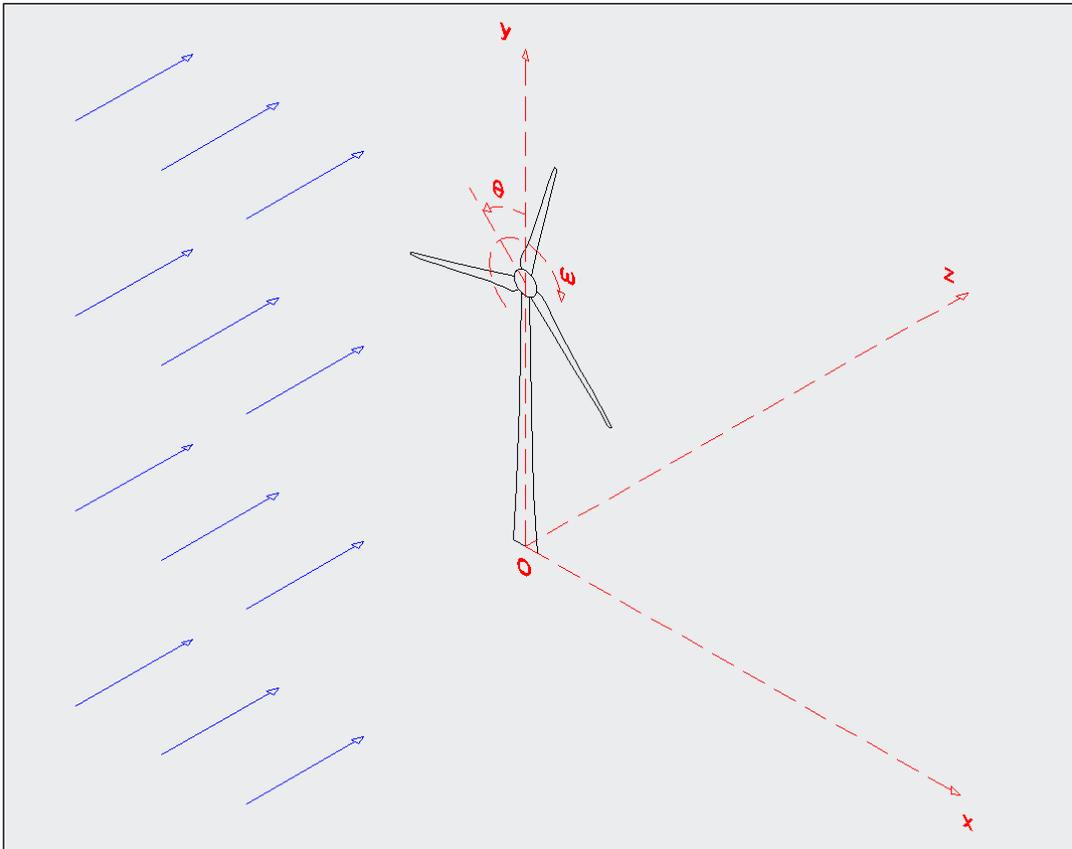


Figura 1: Riferimento del sistema

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:

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

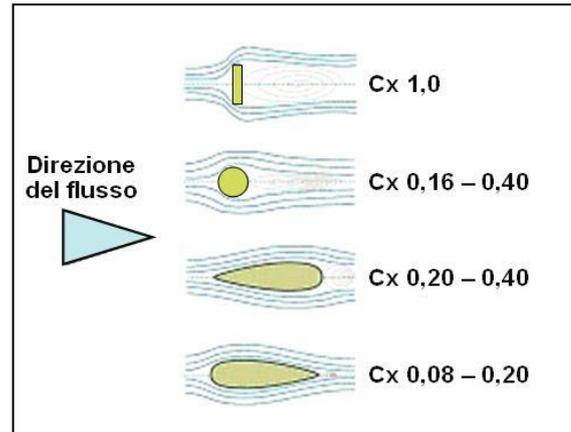
Infine sull'oggetto in volo agisce la forza del vento parallela all'asse delle z :

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

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.

E' 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 |

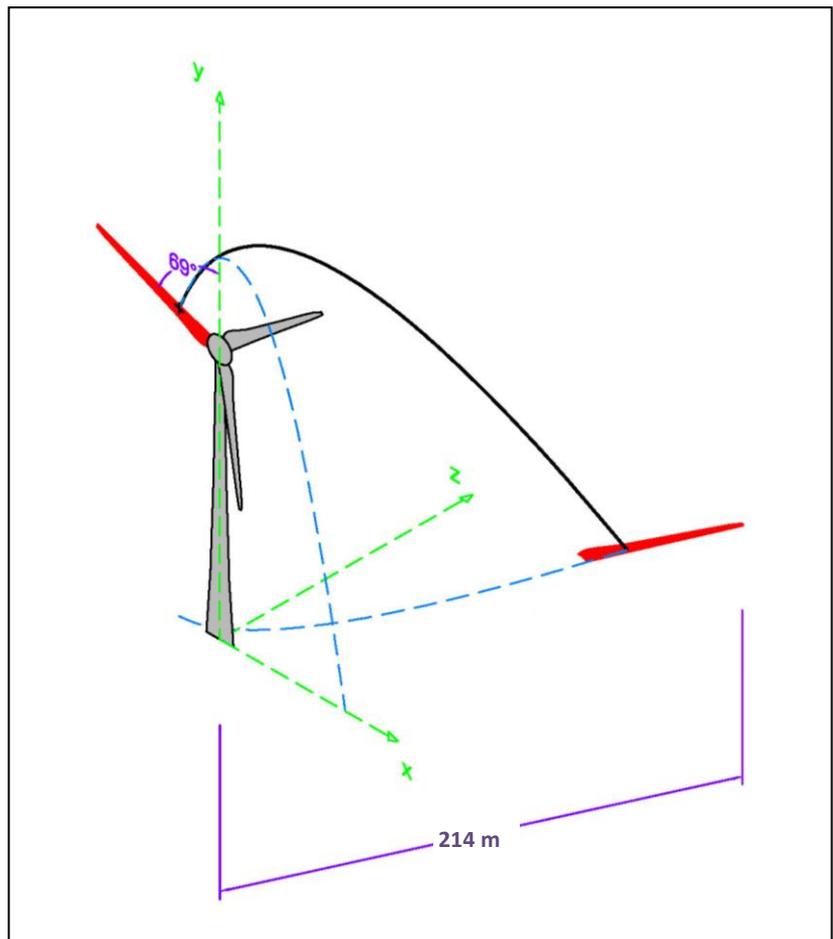
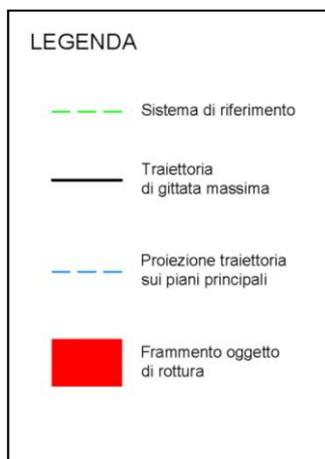
| | | | | | | |
|----|--------|--------|-------|-------|---------|----------|
| 66 | -21,32 | 149,49 | 15,90 | 35,71 | 10,2536 | 213,2543 |
| 67 | -21,48 | 149,12 | 15,28 | 35,99 | 10,2909 | 213,384 |
| 68 | -21,63 | 148,74 | 14,65 | 36,25 | 10,3266 | 213,4558 |
| 69 | -21,78 | 148,36 | 14,01 | 36,50 | 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:

$c_x =$ variabile (0,08 ÷ 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 |

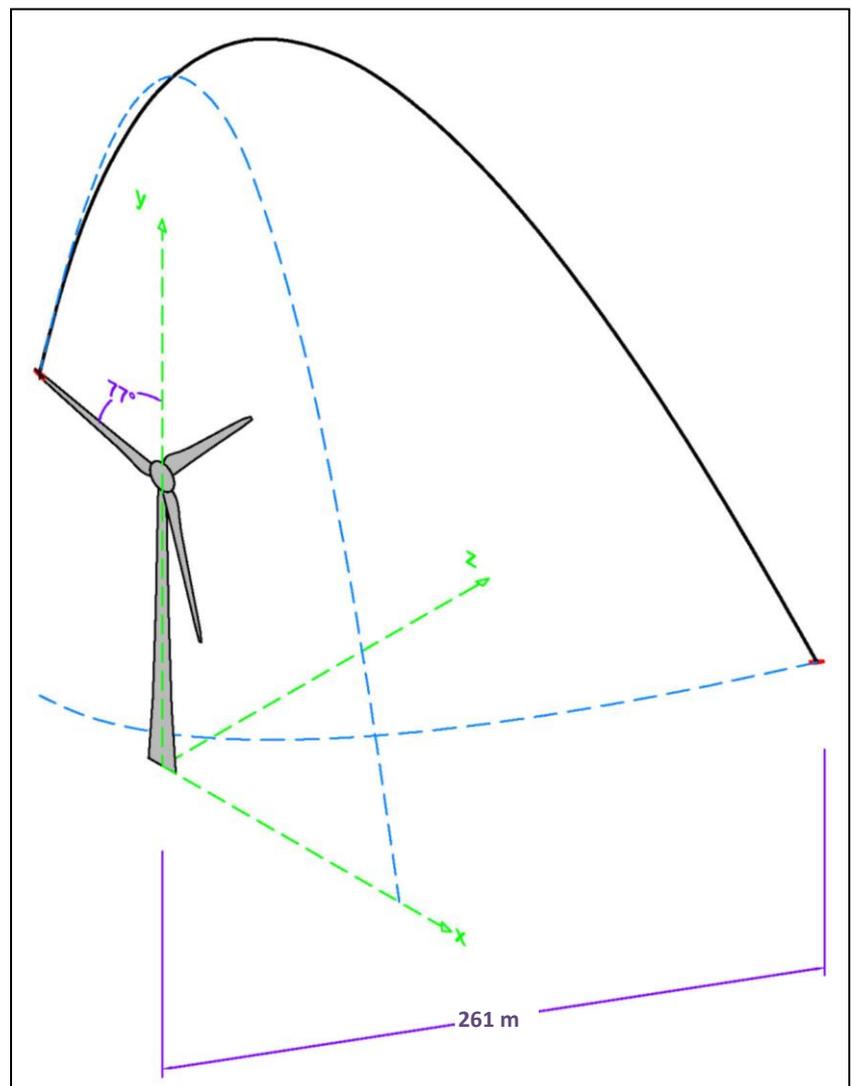
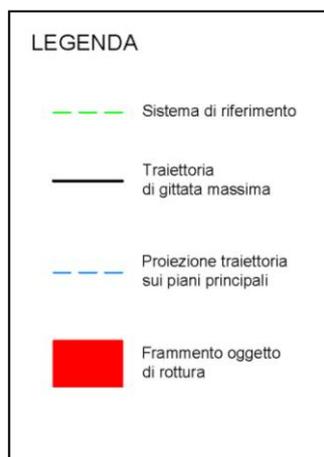
| | | | | | | |
|----|--------|--------|-------|--------|---------|----------|
| 67 | -62,13 | 166,37 | 44,19 | 104,11 | 22,7177 | 250,2996 |
| 68 | -62,58 | 165,29 | 42,37 | 104,86 | 22,8531 | 251,9181 |
| 69 | -63,02 | 164,19 | 40,53 | 105,59 | 22,9826 | 253,4484 |
| 70 | -63,43 | 163,09 | 38,68 | 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 metri. **In tal caso si ottiene la gittata massima, pari a 261 metri, con un angolo di lancio $\theta = 77^\circ$.**