



COMUNI DI LESINA E SAN PAOLO DI CIVITATE
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

ATS ALEXINA

DITTA

AEP Srl

A20

PAGG. 23

Titolo dell'allegato:

**CALCOLO SULLA GITTATA MASSIMA DEGLI
ELEMENTI ROTANTI**

REV	DESCRIZIONE	DATA
1	EMISSIONE	29/12/2021

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: 10
Potenza complessiva: fino a 60 MW.

Il proponente:

AEP Srl
P.zza Giovanni Paolo II, 8
71017 Torremaggiore (FG)
0882/393197
aepvento@pec.it

Il progettista:

ATS Engineering s.r.l.
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
MODELLO DI CALCOLO DELLA GITTATA	4
SPECIFICHE TECNICHE DI UN AEROGENERATORE avente:	9
STUDIO DEL PROBLEMA	9
CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEGLI ELEMENTI ROTANTI.....	11
<i>Caso 1 - Distacco dell'intera pala (lunghezza: 90 metri).....</i>	<i>11</i>
<i>Caso 2 - Distacco di un pezzo di estremità della pala (lunghezza: 5 metri).....</i>	<i>17</i>
CONCLUSIONI	23

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 “*ATS ALEXINA*” previsto nel comune *Lesina e San Paolo di Civitate*, in provincia di Foggia.

L'impianto sarà composto da 10 aerogeneratori con potenza fino a 6 MW. La potenza complessiva prodotta dall'impianto potrà arrivare fino a 60 MW. L'impianto verrà allacciato alla rete di distribuzione AT secondo quanto definito dal codice di rete.

Le torri prese in considerazione per il parco eolico “*ATS ALEXINA*” avranno altezza al mozzo fino a 140 m e diametro rotore fino a 180 m ma 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.

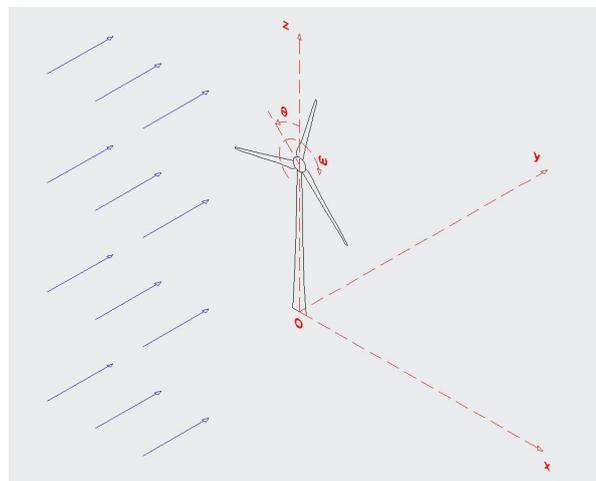
Oltre ai componenti su elencati vi è un sistema di controllo che regola la velocità di rotazione del rotore, agendo sull'angolo di attacco delle pale, e che modifica l'orientamento della navicella

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



Riferimento del sistema

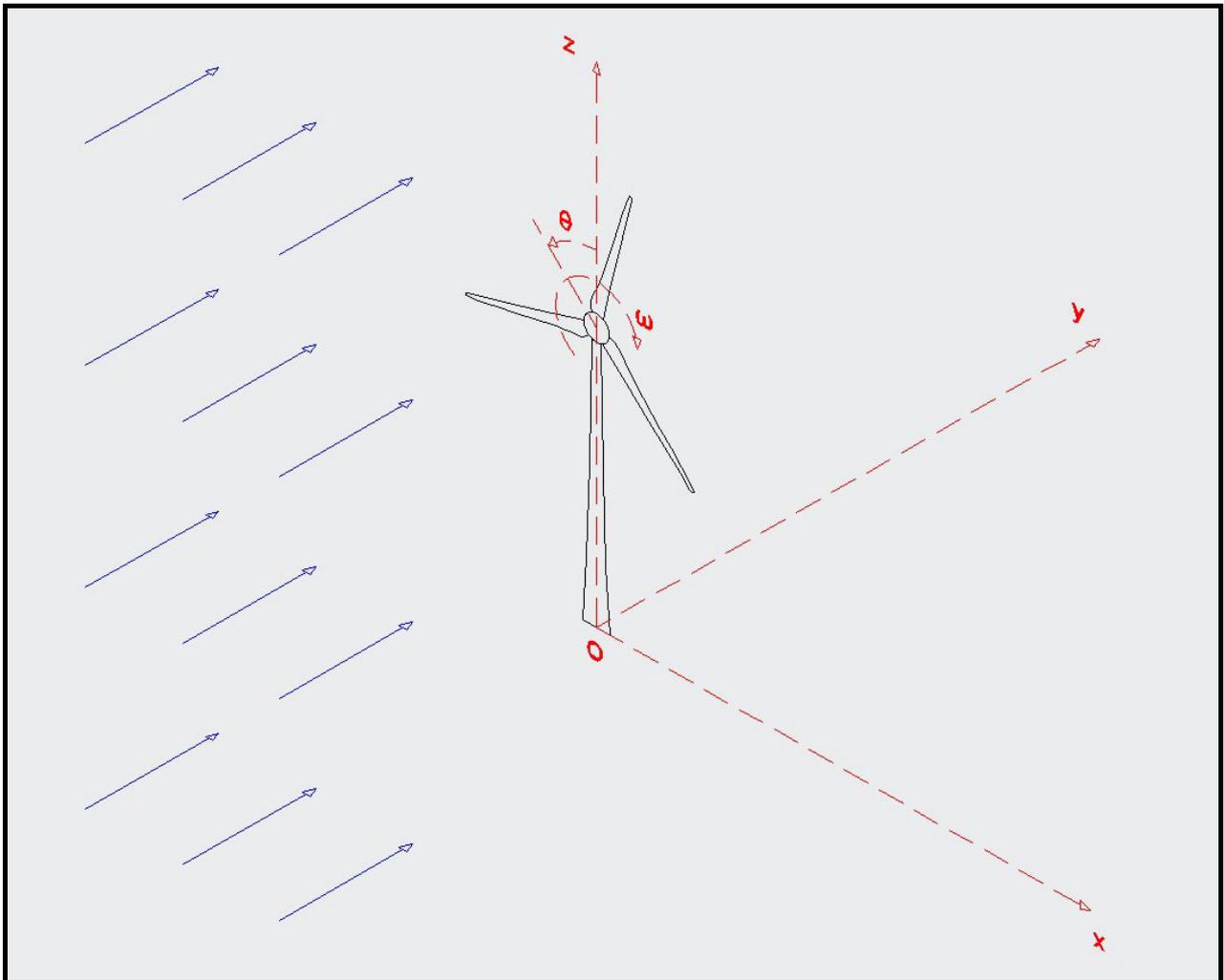
MODELLO DI CALCOLO DELLA GITTATA

Nello specifico caso della valutazione della gittata massima della pala o di un frammento di essa vengono considerate come condizioni al contorno:

- densità dell'aria;
- velocità del vento m/s corrispondente alla massima velocità prima che vengano automaticamente poste in stallo le pale;
- velocità di rotazione della pala giri/min corrispondente al valore della velocità massima consentita;

rappresentative di ipotesi cautelative perché corrispondenti a valori dei parametri fondamentali che massimizzano la gittata.

Adottando il sistema di riferimento riportato in figura seguente



In condizioni di regime normale il vento che agisce in direzione ortogonale al piano delle pale, secondo una direzione parallela all'asse Y ($v_w = v_{wy}$), induce il moto rotatorio delle pale che

ruotano nel piano XZ con velocità angolare costante ω descrivendo una circonferenza di raggio R_p , mentre il baricentro G della singola pala descrive, invece, una circonferenza di raggio R_t , usualmente ritenuto pari a circa $1/3$ di R_p (baricentro, ubicato a circa $1/3$ della lunghezza della pala). La pala non subisce rotazioni rispetto agli assi r-r, s-s, t-t.

In tali condizioni le caratteristiche geometriche e cinematiche del moto del baricentro di una specifica pala possono essere espresse in funzione dell'angolo θ , formato tra l'asse della torre e l'asse longitudinale della pala:

- la posizione del baricentro G (X_{0G} , Y_{0G} , Z_{0G}):

$$X_{0G} = R_G \sin\theta; Y_{0G} = 0; Z_{0G} = H_t - R_G \cos\theta \quad \text{con } R_G = 1/3 R_P$$

- la velocità V_{0G} del baricentro G ha direzione ortogonale all'asse longitudinale della pala, in quanto tangente alla circonferenza di raggio R_G , verso coerente con quello di rotazione ω e componenti V_{0x} , V_{0y} , V_{0z} :

$$V_{0x} = -V_{0G} \sin\theta; V_{0y} = 0; V_{0z} = V_{0G} \cos\theta \quad \text{con } V_{0G} = (\omega \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_G) / 60$$

Al variare della posizione della pala, descritta dall'angolo θ , cambiano, quindi, le condizioni cinematiche e la posizione del baricentro G.

In condizioni di distacco della pala o di un suo frammento, le relazioni precedentemente descritte e le relative grandezze fisiche che esse rappresentano corrispondono solo alle condizioni di inizio distacco, coincidenti con l'origine dei tempi ($t=0$), mentre il resto del campo di moto ($t>0$) richiede una trattazione più complessa nella quale viene considerata l'analisi tridimensionale del moto rotazionale di un corpo di dimensioni non trascurabili che si muove ruotando attorno al proprio baricentro rispetto ai tre assi ortogonali di riferimento (r-r, s-s, t-t) e traslando nelle direzioni degli assi X, Y, Z.

Nel caso della stima del valore della gittata massima, possono essere utilizzati modelli semplificati che assimilano il moto a quello irrotazionale di un corpo puntiforme avente massa e centro di gravità coincidenti con quelli dell'oggetto distaccato e assoggettato alle forze aerodinamiche agenti su di esso. Tale metodologia consente lo sviluppo di calcoli più agili, ma garantisce ottimi margini di approssimazione ed assicura valutazioni ampiamente cautelative e, quindi, a vantaggio di sicurezza in quanto le azioni trascurate indurrebbero comunque ulteriori dissipazioni e ridurrebbero i valori di gittata massima.

L'elemento considerato, al momento del distacco ($t=0$), presenta le caratteristiche cinematiche e geometriche descritte in precedenza, ma su di esso agiscono anche:

- la forza peso F_g , che ha direzione verticale Z e verso contrario a quello dell'asse Z
 $F_g = m \cdot g$ in cui m è la massa della pala e g è l'accelerazione di gravità

- la resistenza aerodinamica F_V che ha direzione analoga a quella del vettore velocità V di traslazione della pala, ma verso contrario, scomponibile nelle sue componenti principali, corrispondenti al moto traslatorio nel piano X-Z ed Y-Z

$$F_{XZ} = -1/2 C \cdot \rho \cdot S \cdot (v_{XZ})^2; \quad F_Y = -1/2 C \cdot \rho \cdot S \cdot (w - v_y)^2$$

In cui:

$$v_{XZ} = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad \text{con} \quad \tan \beta = v_z / v_x$$

e quindi:

$$F_X = F_{XZ} \cdot \cos \beta; \quad F_Z = F_{XZ} \cdot \sin \beta$$

È bene sottolineare che tali espressioni corrispondono all'assunzione che la pala o il frammento nel loro moto, ruotino progressivamente attorno al loro asse t-t, conservando sempre una direzione ortogonale al vettore velocità V_{XZ} .

Avendo indicato con:

- C il coefficiente di resistenza aerodinamica o di forma che è assunto pari a 0.50, per l'intera pala e 0.52 per il frammento che ha forma più tozza e quindi resistenza maggiore;
- ρ la densità dell'aria, che è funzione della temperatura e della quota sul livello del mare ed è assunta cautelativamente pari a $1,23 \text{ Kg/m}^3$;
- S la superficie maestra della pala ortogonale alla direzione del moto,
- v la velocità di traslazione della pala, tangente alla traiettoria nel punto considerato;
- w la velocità del vento assunta pari a 25 m/s , corrispondente alla massima velocità prima che vengano automaticamente poste in stallo le pale;
- ω la velocità di rotazione della pala assunta pari a 16 giri/min , corrispondente alla massima velocità di rotazione possibile per il tipo di aerogeneratore considerato.

Quindi, applicando il secondo principio della dinamica, è possibile scrivere, nel generico istante t , le equazioni di moto in ciascuna delle direzioni principali:

- Lungo la direzione X, sul corpo di massa m dotato di una certa velocità V_x agirà l'azione della resistenza dell'aria F_x (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione a_x

$$m \cdot a_x(t) = -F_{xz}(t) \cdot \cos\beta(t)$$

- Lungo la direzione Y, sul corpo di massa m dotato di una certa velocità v_y agirà l'azione della resistenza dell'aria F_y (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e quindi il corpo subisce un'accelerazione a_y

$$m \cdot a_y(t) = -F_y(t)$$

- Lungo la direzione Z, sul corpo di massa m dotato di una certa velocità v_z , agiranno l'azione della resistenza dell'aria F_z , (sempre di verso opposto alla direzione della velocità di traslazione) e l'azione della forza peso $-m \cdot g$, quindi il corpo subisce un'accelerazione a_z

$$m \cdot a_z(t) = -F_{xz}(t) \cdot \sin\beta(t) - m \cdot g$$

Che permettono di ricavare i valori delle accelerazioni a_x , a_y , a_z , nelle direzioni degli assi principali di riferimento X, Y, Z.

Conseguentemente le componenti della velocità v risultano espresse dalle relazioni:

$$v_x(t+\Delta t) = v_x(t) + a_x(t) \cdot \Delta t$$

$$v_y(t+\Delta t) = v_y(t) + a_y(t) \cdot \Delta t$$

$$v_z(t+\Delta t) = v_z(t) + a_z(t) \cdot \Delta t$$

E le componenti dello spostamento dalle relazioni:

$$X(t+\Delta t) = X(t) + v_x(t) \cdot \Delta t + 1/2 a_x(t) \cdot \Delta t^2$$

$$Y(t+\Delta t) = Y(t) + v_y(t) \cdot \Delta t + 1/2 a_y(t) \cdot \Delta t^2$$

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) + v_z(t) \cdot \Delta t + 1/2 a_z(t) \cdot \Delta t^2$$

Che descrivono le caratteristiche del moto della pala o del frammento nel generico istante di tempo considerato t e che possono essere integrate, a partire dall'istante di

distacco assunto pari a zero ($t_0=0$), adottando un procedimento alle differenze finite con un passo di integrazione sufficientemente piccolo (nel seguito considerato pari a 0.1s).

In tale modo si ricavano le coordinate (X_t, Y_t, Z_t) della traiettoria e le caratteristiche cinematiche del moto ($v_{xt}, v_{yt}, v_{zt}, a_{xt}, a_{yt}, a_{zt}$) in ogni istante e si valuta il tempo t_v (tempo di volo) per il quale il corpo giunge al suolo in corrispondenza del punto più lontano di coordinate ($X_{max}, Y_{tv}, Z_{tv}=0$).

Ricavate le coordinate del punto di atterraggio della pala o del frammento è necessario valutare la distanza vettoriale di detto punto dall'origine degli assi (0,0,0), coincidente con la base della torre, attraverso la relazione:

$$L_{tv} = \sqrt{X_{tv}^2 + Y_{tv}^2}$$

La Gittata Vettoriale si ottiene quindi sommando, al valore L_{tv} ricavato, la distanza tra l'estremità dell'elemento ed il suo baricentro:

$$\text{Gittata Vettoriale Pala} = L_{tv} + R_p - R_{Gp}$$

$$\text{Gittata Vettorial e Frammento} = L_{tv} + R_p - R_{Gf}$$

Indicando con il pedice p i termini riferiti alla pala e con il pedice f quelli riferiti al frammento.

Al variare della posizione assunta dalla pala (angolo γ) nell'istante del distacco ($t_0=0$) cambiano le condizioni iniziali (X_{0G}, Y_{0G}, Z_{0G}), con esse, tutti i parametri che definiscono la traiettoria seguita dalla pala stessa, quindi, la distanza massima del punto di caduta dall'asse della torre stessa.

la stima della Gittata Vettoriale Massima si ottiene ripetendo il calcolo per differenti angoli iniziali γ ed individuando i parametri relativi alle condizioni più sfavorevoli.

SPECIFICHE TECNICHE DI UN AEROGENERATORE avente:

Diametro Rotore [m]	180
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]	25,0

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 = 25 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 z .

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 $-z$.

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:

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

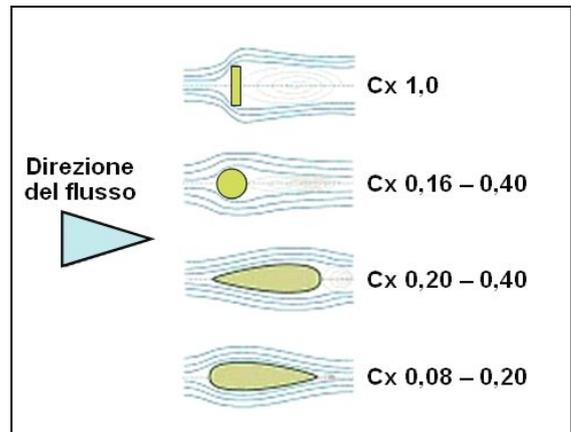
Infine sull'oggetto in volo agisce la forza del vento parallela all'asse delle y :

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

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 y , 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: 90 metri)

Si considerano i seguenti dati:

Velocità del vento, al momento della rottura:

$$w_s = 25 \text{ m/s}$$

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:

$$D = 30 \text{ m}$$

Velocità tangenziale:

$$v_0 = 50,27 \text{ m/s}$$

Densità dell'aria:

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

Coefficiente di forma:

$$c_x = 0.50$$

Superficie di riferimento:

$$S = 385 \text{ m}^2$$

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:

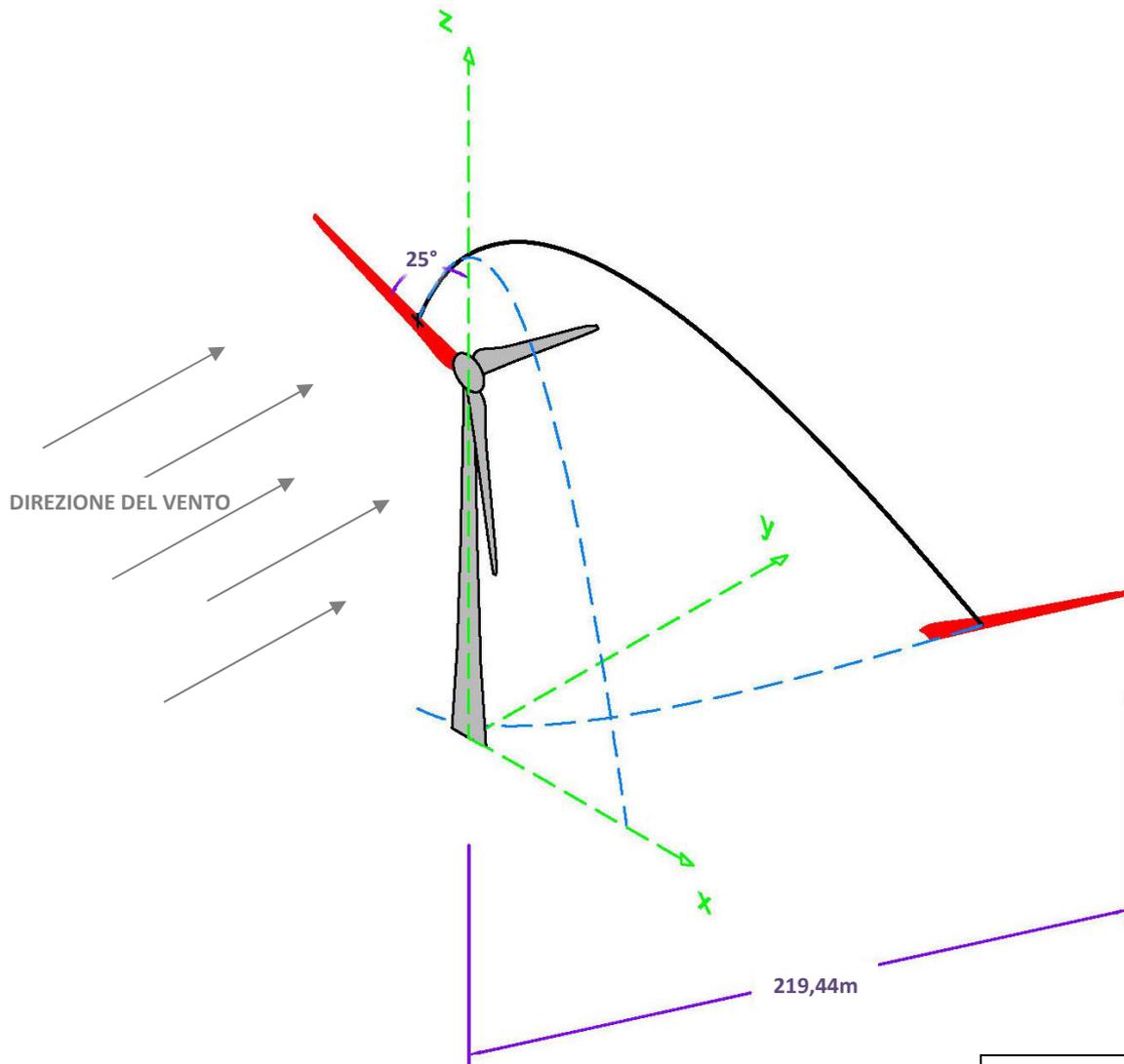
θ	x_0	z_0	v_x	v_z	t	Gittata
°	m	m	m/s	m/s	s	m
0	0,00	170,00	50,27	0,00	5,8871	213,4206
1	-0,52	170,00	50,26	0,88	5,9772	213,9352
2	-1,05	169,98	50,23	1,75	6,0684	214,4245

3	-1,57	169,96	50,20	2,63	6,1607	214,8886
4	-2,09	169,93	50,14	3,51	6,2542	215,3278
5	-2,61	169,89	50,07	4,38	6,3487	215,7424
6	-3,14	169,84	49,99	5,25	6,4442	216,1326
7	-3,66	169,78	49,89	6,13	6,5408	216,4987
8	-4,18	169,71	49,78	7,00	6,6383	216,8411
9	-4,69	169,63	49,65	7,86	6,7367	217,1602
10	-5,21	169,54	49,50	8,73	6,8360	217,4563
11	-5,72	169,45	49,34	9,59	6,9360	217,7299
12	-6,24	169,34	49,17	10,45	7,0369	217,9814
13	-6,75	169,23	48,98	11,31	7,1385	218,2112
14	-7,26	169,11	48,77	12,16	7,2407	218,4198
15	-7,76	168,98	48,55	13,01	7,3435	218,6077
16	-8,27	168,84	48,32	13,86	7,4469	218,7752
17	-8,77	168,69	48,07	14,70	7,5508	218,923
18	-9,27	168,53	47,81	15,53	7,6551	219,0513
19	-9,77	168,37	47,53	16,36	7,7598	219,1606
20	-10,26	168,19	47,23	17,19	7,8648	219,2514
21	-10,75	168,01	46,93	18,01	7,9701	219,324
22	-11,24	167,82	46,61	18,83	8,0755	219,3789
23	-11,72	167,62	46,27	19,64	8,1811	219,4162
24	-12,20	167,41	45,92	20,44	8,2867	219,4364
25	-12,68	167,19	45,56	21,24	8,3924	219,4396
26	-13,15	166,96	45,18	22,03	8,4980	219,4261
27	-13,62	166,73	44,79	22,82	8,6034	219,396

28	-14,08	166,49	44,38	23,60	8,7086	219,3494
29	-14,54	166,24	43,96	24,37	8,8136	219,2863
30	-15,00	165,98	43,53	25,13	8,9183	219,2066
31	-15,45	165,72	43,09	25,89	9,0225	219,1102
32	-15,90	165,44	42,63	26,64	9,1263	218,997
33	-16,34	165,16	42,16	27,38	9,2296	218,8666
34	-16,78	164,87	41,67	28,11	9,3323	218,7186
35	-17,21	164,57	41,18	28,83	9,4343	218,5526
36	-17,63	164,27	40,67	29,55	9,5356	218,368
37	-18,05	163,96	40,14	30,25	9,6362	218,164
38	-18,47	163,64	39,61	30,95	9,7359	217,9399
39	-18,88	163,31	39,06	31,63	9,8347	217,6948
40	-19,28	162,98	38,51	32,31	9,9325	217,4275
41	-19,68	162,64	37,94	32,98	10,0293	217,1369
42	-20,07	162,29	37,35	33,63	10,1250	216,8217
43	-20,46	161,94	36,76	34,28	10,2196	216,4805
44	-20,84	161,58	36,16	34,92	10,3130	216,1116
45	-21,21	161,21	35,54	35,54	10,4051	215,7132
46	-21,58	160,84	34,92	36,16	10,4958	215,2834
47	-21,94	160,46	34,28	36,76	10,5853	214,8202
48	-22,29	160,07	33,63	37,35	10,6732	214,3212
49	-22,64	159,68	32,98	37,94	10,7597	213,7841
50	-22,98	159,28	32,31	38,51	10,8447	213,2061
51	-23,31	158,88	31,63	39,06	10,9281	212,5846
52	-23,64	158,47	30,95	39,61	11,0098	211,9164

53	-23,96	158,05	30,25	40,14	11,0899	211,1983
54	-24,27	157,63	29,55	40,67	11,1682	210,427
55	-24,57	157,21	28,83	41,18	11,2448	209,5989
56	-24,87	156,78	28,11	41,67	11,3195	208,71
57	-25,16	156,34	27,38	42,16	11,3923	207,7564
58	-25,44	155,90	26,64	42,63	11,4633	206,7339
59	-25,72	155,45	25,89	43,09	11,5322	205,638
60	-25,98	155,00	25,13	43,53	11,5992	204,4642
61	-26,24	154,54	24,37	43,96	11,6642	203,2076
62	-26,49	154,08	23,60	44,38	11,7270	201,8634
63	-26,73	153,62	22,82	44,79	11,7878	200,4267
64	-26,96	153,15	22,03	45,18	11,8464	198,8922
65	-27,19	152,68	21,24	45,56	11,9028	197,2551
66	-27,41	152,20	20,44	45,92	11,9570	195,5102
67	-27,62	151,72	19,64	46,27	12,0089	193,6527
68	-27,82	151,24	18,83	46,61	12,0586	191,6782
69	-28,01	150,75	18,01	46,93	12,1059	189,5826
70	-28,19	150,26	17,19	47,23	12,1509	187,3625
71	-28,37	149,77	16,36	47,53	12,1936	185,0155
72	-28,53	149,27	15,53	47,81	12,2338	182,5405
73	-28,69	148,77	14,70	48,07	12,2716	179,938
74	-28,84	148,27	13,86	48,32	12,3070	177,2109
75	-28,98	147,76	13,01	48,55	12,3399	174,3653
76	-29,11	147,26	12,16	48,77	12,3703	171,411
77	-29,23	146,75	11,31	48,98	12,3982	168,3632

78	-29,34	146,24	10,45	49,17	12,4236	165,2438
79	-29,45	145,72	9,59	49,34	12,4465	162,083
80	-29,54	145,21	8,73	49,50	12,4668	158,9225
81	-29,63	144,69	7,86	49,65	12,4845	155,8172
82	-29,71	144,18	7,00	49,78	12,4996	152,8394
83	-29,78	143,66	6,13	49,89	12,5122	150,0814
84	-29,84	143,14	5,25	49,99	12,5221	147,6585
85	-29,89	142,61	4,38	50,07	12,5294	145,7101
86	-29,93	142,09	3,51	50,14	12,5341	144,3977
87	-29,96	141,57	2,63	50,20	12,5361	143,8981
88	-29,98	141,05	1,75	50,23	12,5355	-144,391
89	-30,00	140,52	0,88	50,26	12,5323	-146,04
90	-30,00	140,00	0,00	50,27	12,5264	-148,977



Gittata massima:

$$L_{max} = 219,44 \text{ m}$$

Angolo zenitale di gittata massima:

$$\theta = 25^\circ$$

LEGENDA	
	Sistema di riferimento
	Traiettoria di gittata massima
	Proiezione traiettoria sui piani principali
	Frammento oggetto di rottura

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:

$$w_s = 25 \text{ m/s}$$

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:

$$D = 87,5 \text{ m}$$

Velocità tangenziale:

$$v_0 = 146,61 \text{ m/s}$$

Densità dell'aria:

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

Coefficiente di forma:

$$c_x = 0,52$$

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:

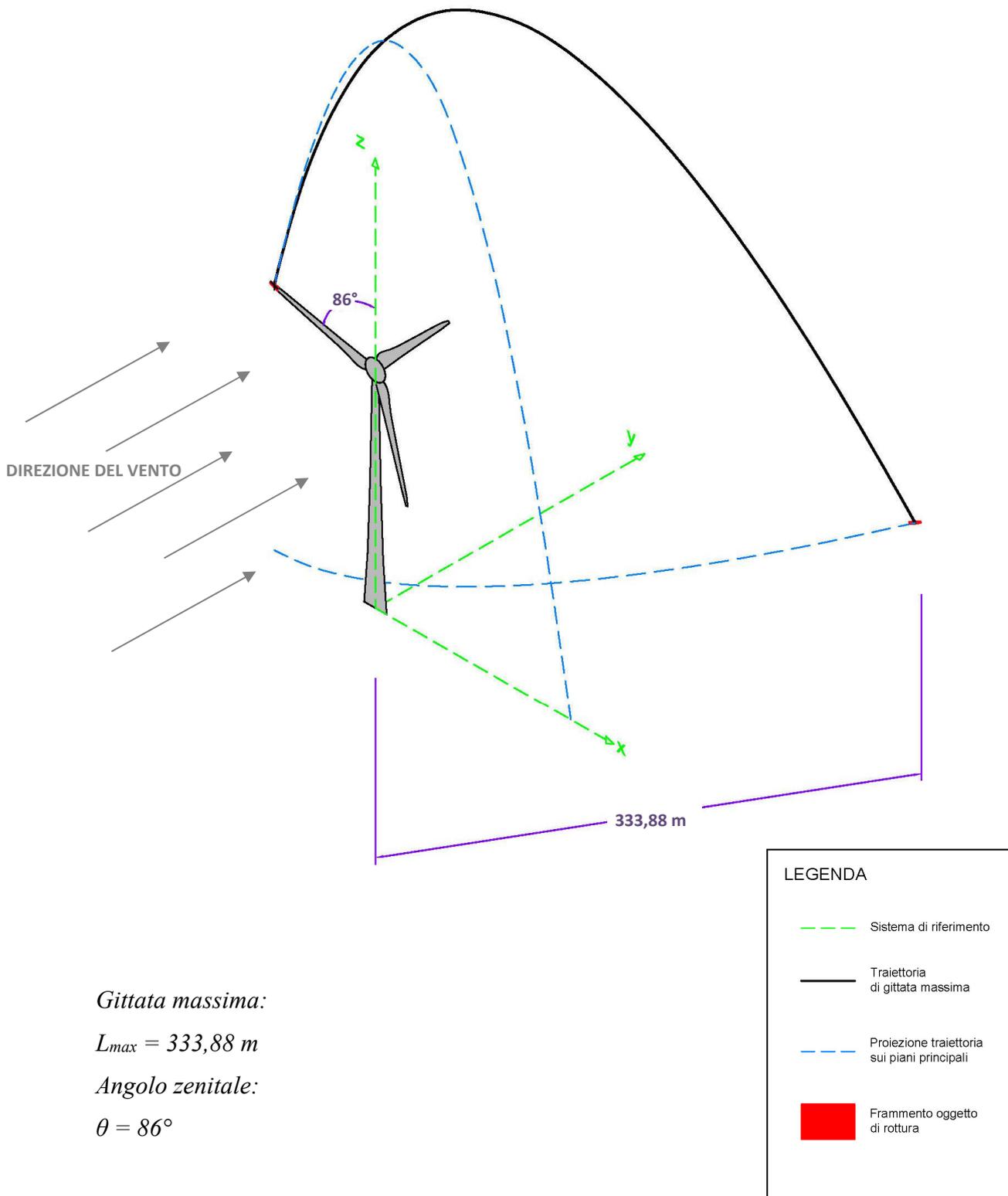
θ	x_0	z_0	v_x	v_z	t	Gittata
°	m	m	m/s	m/s	s	m
0	0,00	227,50	146,61	0,00	6,8104	128,5757
1	-1,53	227,49	146,59	2,56	7,0760	127,2459
2	-3,05	227,45	146,52	5,12	7,3511	125,9463
3	-4,58	227,38	146,41	7,67	7,6355	124,6831
4	-6,10	227,29	146,25	10,23	7,9290	123,4631
5	-7,63	227,17	146,05	12,78	8,2314	122,2934

6	-9,15	227,02	145,80	15,32	8,5424	121,182
7	-10,66	226,85	145,51	17,87	8,8616	120,1372
8	-12,18	226,65	145,18	20,40	9,1886	119,168
9	-13,69	226,42	144,80	22,93	9,5231	118,2841
10	-15,19	226,17	144,38	25,46	9,8646	117,4954
11	-16,70	225,89	143,91	27,97	10,2126	116,8126
12	-18,19	225,59	143,40	30,48	10,5668	116,2465
13	-19,68	225,26	142,85	32,98	10,9266	115,8083
14	-21,17	224,90	142,25	35,47	11,2916	115,5092
15	-22,65	224,52	141,61	37,94	11,6612	115,3604
16	-24,12	224,11	140,93	40,41	12,0351	115,3727
17	-25,58	223,68	140,20	42,86	12,4126	115,5565
18	-27,04	223,22	139,43	45,30	12,7935	115,9215
19	-28,49	222,73	138,62	47,73	13,1771	116,4765
20	-29,93	222,22	137,77	50,14	13,5631	117,2292
21	-31,36	221,69	136,87	52,54	13,9511	118,1862
22	-32,78	221,13	135,93	54,92	14,3405	119,3523
23	-34,19	220,54	134,95	57,28	14,7310	120,7313
24	-35,59	219,94	133,93	59,63	15,1222	122,3251
25	-36,98	219,30	132,87	61,96	15,5138	124,1342
26	-38,36	218,64	131,77	64,27	15,9053	126,1575
27	-39,72	217,96	130,63	66,56	16,2963	128,3925
28	-41,08	217,26	129,45	68,83	16,6866	130,8352
29	-42,42	216,53	128,23	71,08	17,0759	133,4803
30	-43,75	215,78	126,97	73,30	17,4637	136,3216

31	-45,07	215,00	125,67	75,51	17,8499	139,3518
32	-46,37	214,20	124,33	77,69	18,2340	142,5627
33	-47,66	213,38	122,96	79,85	18,6158	145,9456
34	-48,93	212,54	121,54	81,98	18,9951	149,491
35	-50,19	211,68	120,09	84,09	19,3716	153,1892
36	-51,43	210,79	118,61	86,17	19,7450	157,0301
37	-52,66	209,88	117,09	88,23	20,1151	161,0034
38	-53,87	208,95	115,53	90,26	20,4817	165,0987
39	-55,07	208,00	113,94	92,26	20,8444	169,3055
40	-56,24	207,03	112,31	94,24	21,2032	173,6133
41	-57,41	206,04	110,65	96,18	21,5577	178,0119
42	-58,55	205,03	108,95	98,10	21,9079	182,4907
43	-59,67	203,99	107,22	99,99	22,2534	187,0397
44	-60,78	202,94	105,46	101,84	22,5942	191,6489
45	-61,87	201,87	103,67	103,67	22,9299	196,3082
46	-62,94	200,78	101,84	105,46	23,2605	201,008
47	-63,99	199,67	99,99	107,22	23,5857	205,7389
48	-65,03	198,55	98,10	108,95	23,9055	210,4914
49	-66,04	197,41	96,18	110,65	24,2195	215,2564
50	-67,03	196,24	94,24	112,31	24,5278	220,025
51	-68,00	195,07	92,26	113,94	24,8301	224,7884
52	-68,95	193,87	90,26	115,53	25,1263	229,538
53	-69,88	192,66	88,23	117,09	25,4162	234,2656
54	-70,79	191,43	86,17	118,61	25,6997	238,9629
55	-71,68	190,19	84,09	120,09	25,9766	243,622

56	-72,54	188,93	81,98	121,54	26,2470	248,2352
57	-73,38	187,66	79,85	122,96	26,5105	252,7948
58	-74,20	186,37	77,69	124,33	26,7672	257,2934
59	-75,00	185,07	75,51	125,67	27,0168	261,7239
60	-75,78	183,75	73,30	126,97	27,2593	266,0793
61	-76,53	182,42	71,08	128,23	27,4945	270,3527
62	-77,26	181,08	68,83	129,45	27,7225	274,5376
63	-77,96	179,72	66,56	130,63	27,9430	278,6277
64	-78,64	178,36	64,27	131,77	28,1559	282,6165
65	-79,30	176,98	61,96	132,87	28,3612	286,4982
66	-79,94	175,59	59,63	133,93	28,5588	290,267
67	-80,54	174,19	57,28	134,95	28,7486	293,9173
68	-81,13	172,78	54,92	135,93	28,9306	297,4436
69	-81,69	171,36	52,54	136,87	29,1045	300,8407
70	-82,22	169,93	50,14	137,77	29,2704	304,1038
71	-82,73	168,49	47,73	138,62	29,4283	307,228
72	-83,22	167,04	45,30	139,43	29,5779	310,2087
73	-83,68	165,58	42,86	140,20	29,7193	313,0416
74	-84,11	164,12	40,41	140,93	29,8524	315,7226
75	-84,52	162,65	37,94	141,61	29,9771	318,2475
76	-84,90	161,17	35,47	142,25	30,0935	320,6125
77	-85,26	159,68	32,98	142,85	30,2013	322,8137
78	-85,59	158,19	30,48	143,40	30,3006	324,8472
79	-85,89	156,70	27,97	143,91	30,3914	326,7085
80	-86,17	155,19	25,46	144,38	30,4736	328,3922

81	-86,42	153,69	22,93	144,80	30,5472	329,891
82	-86,65	152,18	20,40	145,18	30,6120	331,1936
83	-86,85	150,66	17,87	145,51	30,6682	332,282
84	-87,02	149,15	15,32	145,80	30,7156	333,1264
85	-87,17	147,63	12,78	146,05	30,7543	333,6798
86	-87,29	146,10	10,23	146,25	30,7842	333,8812
87	-87,38	144,58	7,67	146,41	30,8053	333,7083
88	-87,45	143,05	5,12	146,52	30,8176	333,4453
89	-87,49	141,53	2,56	146,59	30,8210	-334,779
90	-87,50	140,00	0,00	146,61	30,8157	-344,77



Gittata massima:

$$L_{max} = 333,88 \text{ m}$$

Angolo zenitale:

$$\theta = 86^\circ$$

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 333,88 m, con un angolo di lancio $\theta = 86^\circ$.