

AUTORIZZAZIONE UNICA Ex D. LGS. N. 387/2003



PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO COLOBRARO TURSI

Titolo elaborato:

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

TL	GD	WPD	EMISSIONE	10/01/24	0	0
REDATTO	CONTR.	APPROV.	DESCRIZIONE REVISIONE DOCUMENTO	DATA	REV	

PROPONENTE



WPD MURGE S.R.L.
VIALE LUCA GAURICO 9-11
00143 ROMA

CONSULENZA



GE.CO.D'OR S.R.L.
VIA A. DE GASPERI N. 8
74023 GROTTAGLIE (TA)

PROGETTISTA

ING. GAETANO D'ORONZIO
VIA GOITO 14 – COLOBRARO (MT)

Codice CTSA073	Formato A4	Scala /	Foglio 1 di 35
-------------------	---------------	------------	-------------------

Sommarìo

1.	PREMESSA	3
2.	CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE	3
3.	DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO	6
4.	STUDI CONDOTTI SUGLI INCIDENTI	9
5.	CAUSE DI ROTTURA DELLA PALA O DI PARTE DI ESSA	9
6.	STUDIO DELLA GITTATA	10
7.	ANALISI TEORICA DEL MOTO DI ROTAZIONE COMPLESSO	12
8.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA	13
9.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DELLA PALA	27
10.	CONCLUSIONI	32

1. PREMESSA

Scopo di tale relazione è condurre uno studio nel caso di rottura dell'organo rotante che possa provocare il distacco della pala o di parte della stessa.

Precedenti studi hanno dimostrato che una buona approssimazione della situazione reale è condurre l'analisi in questione tenendo conto unicamente degli effetti gravitazionali.

Lo studio in oggetto dipende da una serie di variabili legate al momento dell'eventuale distacco ed alle modalità dello stesso.

2. CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE

L'aerogeneratore è una macchina rotante che trasforma l'energia cinetica del vento in energia elettrica ed è essenzialmente costituito da una torre (suddivisa in più parti), dalla navicella, dal Drive Train, dall'Hub e tre pale che costituiscono il rotore.

Il progetto prevede l'installazione dell'aerogeneratore di modello Vestas V 150, di potenza nominale pari a 6,0 MWp, altezza torre all'hub pari a 125 m e diametro del rotore di 150 m (**Figura 2.1**).

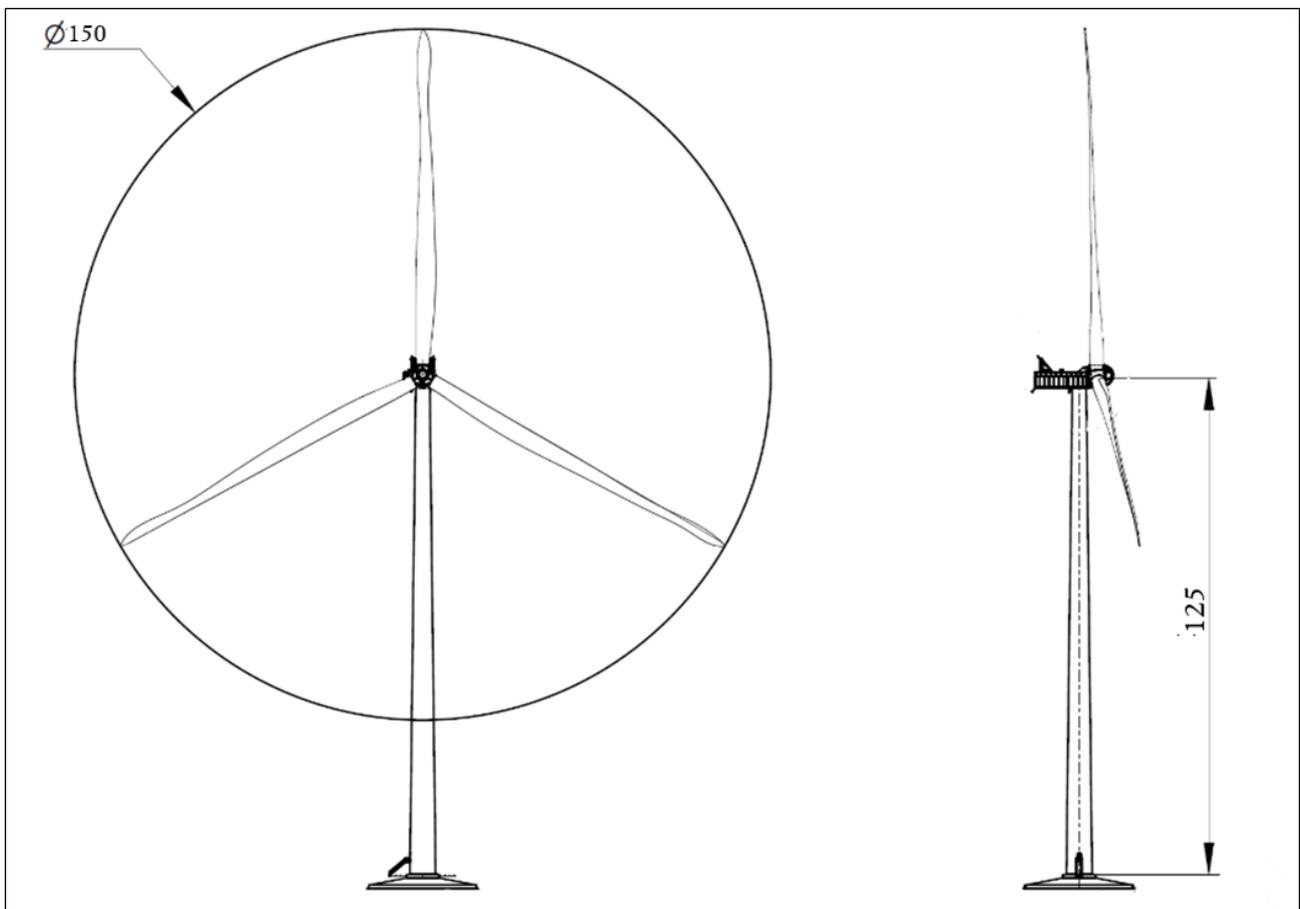


Figura 2.1: Profilo aerogeneratore V150 – 6,0 MWp – HH = 125 m – D = 150 m

Ognuno degli aerogeneratori include un sistema che esegue il controllo della potenza ruotando le pale

intorno al proprio asse principale e il controllo dell'orientamento della navicella (controllo dell'imbardata), che permette l'allineamento della macchina rispetto alla direzione del vento.

Il rotore è a passo variabile in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro ed è posto sopravvento al sostegno.

La **Tabella 2.1** riporta i valori di rpm (revolutions per minute), ovvero il numero di giri o cicli in un minuto compiuti dagli organi rotanti dell'aerogeneratore di progetto in funzione della velocità del vento espressa in m/s.

	V150
	6.0 MW
Wind Speed [m/s]	Speed [RPM]
3.0	4,82
3.5	4,90
4.0	4,93
4.5	5,23
5.0	5,74
5.5	6,30
6.0	6,88
6.5	7,47
7.0	8,06
7.5	8,64
8.0	9,22
8.5	9,76
9.0	10,04
9.5	10,10
10.0	10,12
10.5	10,12
11.0	10,11
11.5	10,12
12.0	10,12
12.5	10,12
13.0	10,12
13.5	10,12
14.0	10,12
14.5	10,12
15.0	10,12
15.5	10,12
16.0	10,12
16.5	10,12
17.0	10,12
17.5	10,09
18.0	9,81
18.5	9,51
19.0	9,22
19.5	8,91
20.0	8,61
20.5	8,31
21.0	8,00
21.5	7,62
22.0	7,27
22.5	6,91
23.0	6,60
23.5	6,35
24.0	6,07
24.5	5,88
25.0	5,88

Tabella 2.1: Rpm del modello Vestas V150
da 6,0 MWp – HH = 125 m – D = 150 m

Le caratteristiche dell'aerogeneratore sopra descritto sono quelle ritenute idonee in base a quanto disponibile oggi sul mercato; in futuro potrà essere possibile cambiare il modello dell'aerogeneratore senza modificare in maniera sostanziale l'impatto ambientale e i limiti di sicurezza previsti.

Ognuna delle turbine è dotata di un completo sistema antifulmine, costituito da un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, in grado di proteggere da danni diretti ed indiretti sia la struttura (interna ed esterna) che le persone.

In questa maniera la corrente del fulmine è scaricata a terra attraverso un sistema di conduttori a bassa impedenza.

I dispositivi antifulmine previsti sono conformi agli standard della più elevata classe di protezione (Classe I), secondo lo Standard Internazionale IEC 61024-1.

Ogni aerogeneratore è dotato altresì di un sistema antincendio, grazie al quale rilevatori di Ossido di Carbonio e fumo, rilevato l'eventuale incendio, attivano un sistema di spegnimento ad acqua atomizzata ad alta pressione nel caso di incendi dei componenti meccanici e a gas inerte (azoto) nel caso di incendi dei componenti elettrici (cabine elettriche e trasformatore).

Oltre a tale sistema le navicelle sono rivestite con materiali autoestinguenti.

Le moderne turbine eoliche sono dotate di un sistema di controllo del passo di rotazione delle pale intorno al loro asse principale.

Si riportano di seguito le coordinate delle posizioni scelte per l'installazione degli aerogeneratori e le relative informazioni catastali (le posizioni sono riferite al punto centrale di ogni aerogeneratore).

ID	Comune	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Foglio	Particella
CT01	Tursi	40.282335°	16.368039°	3	37
CT02	Tursi	40.277595°	16.372991°	3	41
CT03	Tursi	40.274128°	16.379539°	32	1
CT04	Tursi	40.273810°	16.391662°	32	50
CT05	Tursi	40.233869°	16.419128°	36	111
CT06	Colobrarò	40.213621°	16.428702°	34	149-150
CT07	Colobrarò	40.212481°	16.418209°	33	22
CT08	Colobrarò	40.221435°	16.405831°	6	96
CT09	Colobrarò	40.193271°	16.374365°	16	99

ID	Comune	Latitudine [°]	Longitudine [°]	Foglio	Particella
CT10	Colobraro	40.208915°	16.366502°	10	189

Tabella 2.2: Localizzazione planimetrica degli aerogeneratori di progetto

3. DESCRIZIONE GENERALE DELL'IMPIANTO

L'impianto eolico presenta una potenza nominale totale pari a 60 MWp ed è costituito da 10 aerogeneratori, di potenza nominale pari a 6 MWp, altezza torre pari a 125 m e rotore pari a 150 m, collegati tra loro mediante un cavidotto interrato in media tensione che convoglia l'elettricità presso una Stazione Elettrica Utente (SEU) di trasformazione 150/30 kV al fine di collegarsi alla Rete di Trasmissione Nazionale (RTN) Terna attraverso un cavidotto in alta tensione.

L'impianto interessa prevalentemente i Comuni di Colobraro, ove ricadono 5 aerogeneratori, Tursi, ove ricadono 5 aerogeneratori, e il Comune di Sant'Arcangelo, dove verrà realizzata la SEU 150/30 kV, contenuta all'interno di una Stazione Elettrica Condivisa (SEC) con altri produttori di energia, e la nuova Stazione Elettrica (SE) di smistamento a 150 kV della RTN.

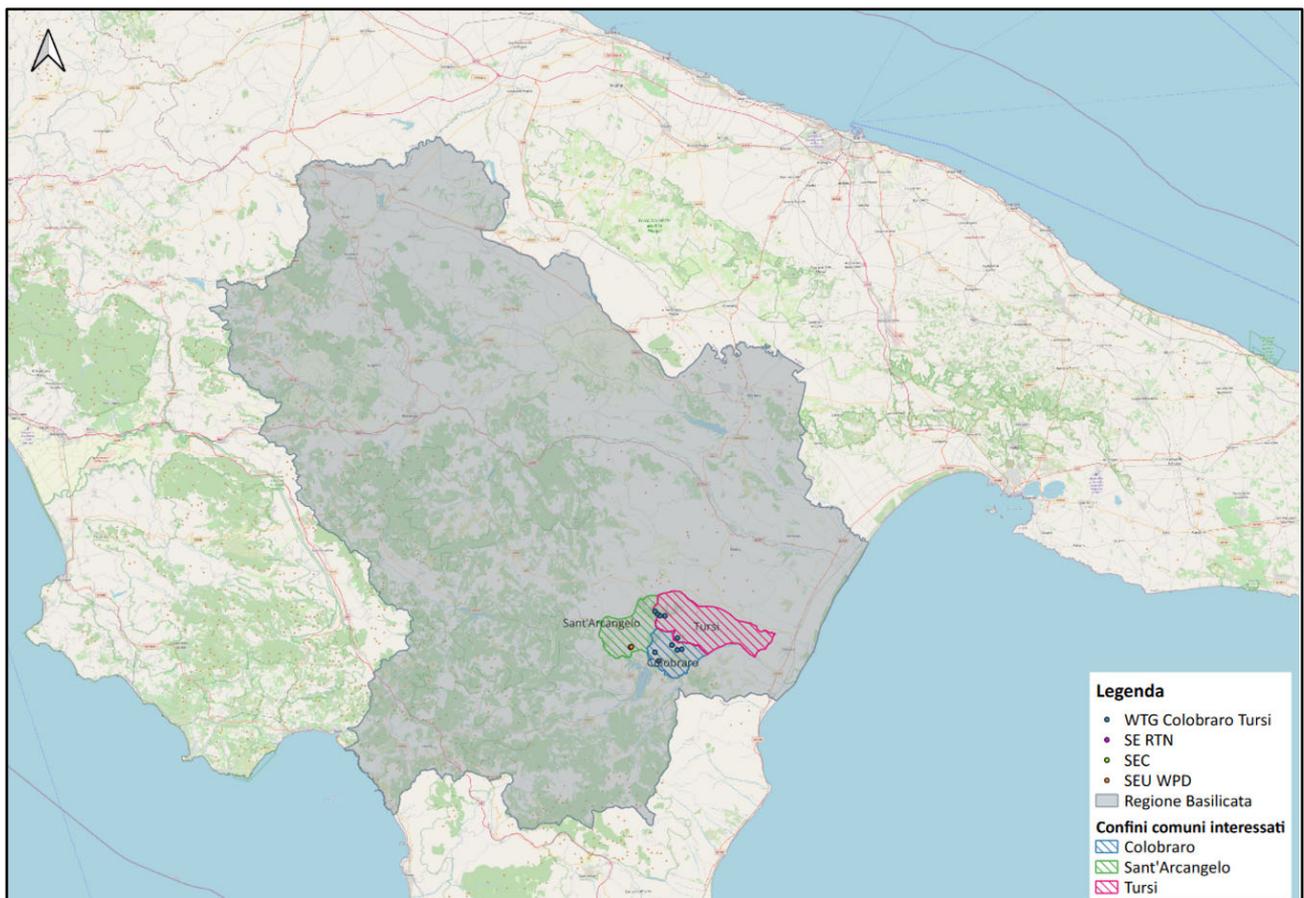


Figura 3.1: Inquadramento territoriale - Limiti amministrativi comuni interessati

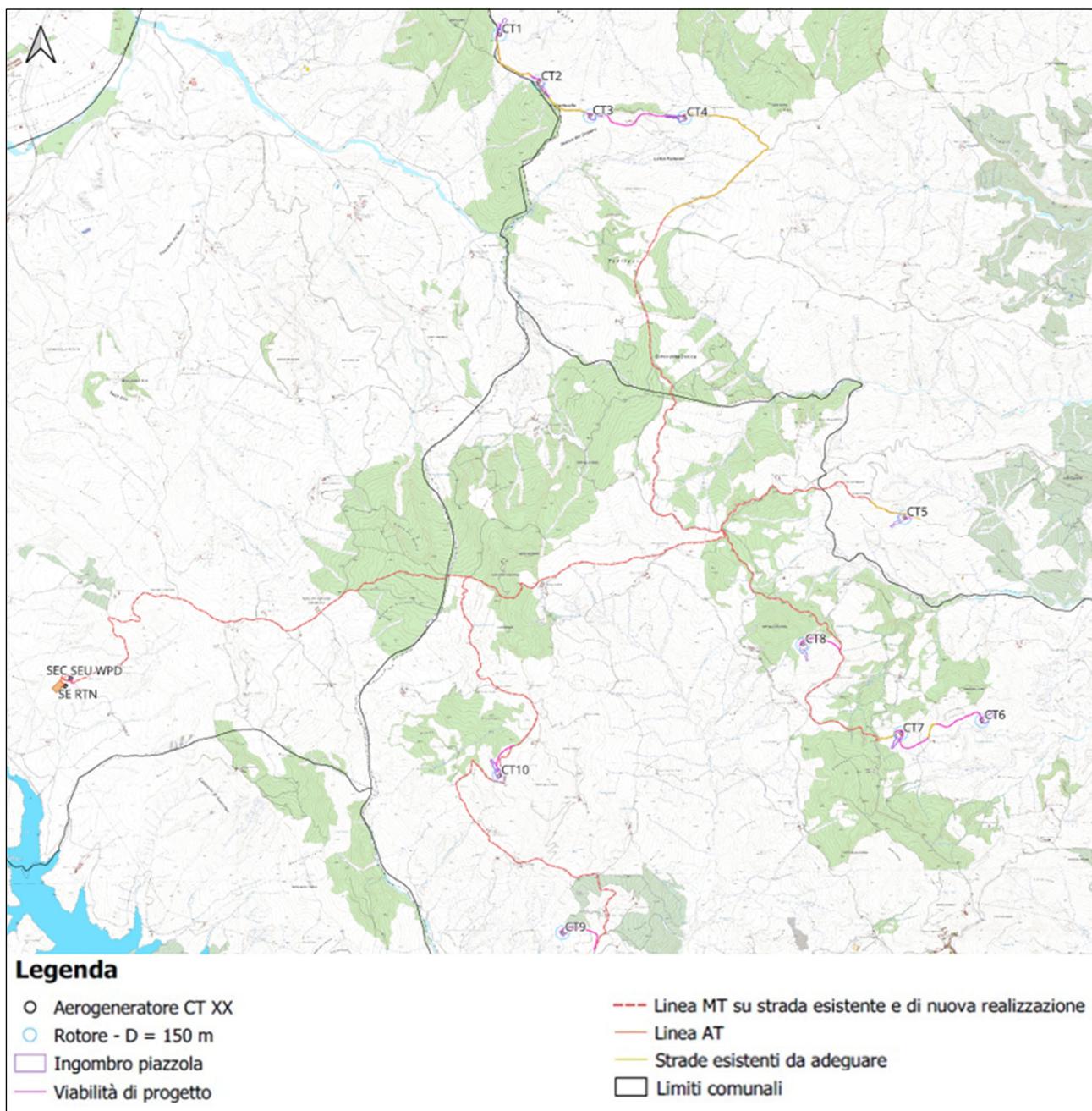


Figura 3.2: Layout d'impianto su CTR

Il Parco eolico risulta suddiviso in tre parti, quella ricadente ad ovest del centro abitato di Colobraro (Zona 1 – rettangolo Rosso), costituita da 2 WTG (Wind Turbine Generator) e che si sviluppa lungo un crinale tra i 400 m e i 700 m s.l.m., in corrispondenza delle C.de Serre, Sirianni, Murge, Santamaria e Cozzo della Croce, quella ricadente a Nord Ovest del centro abitato di Tursi (Zona 2 – rettangolo azzurro), costituita da 4 WTG e che si sviluppa su un altopiano a circa 500 m s.l.m., in corrispondenza della C.da Il Monticello, e quella ricadente in prossimità del confine tra il Comune di Colobraro e il Comune di Tursi (Zona 3 – rettangolo verde), costituita da 4 WTG, che si sviluppa su un altopiano a circa 500 m s.l.m, in corrispondenza della C.da Cozzo della Lite (Colobraro) e C.da Cozzo di Penne (Tursi).

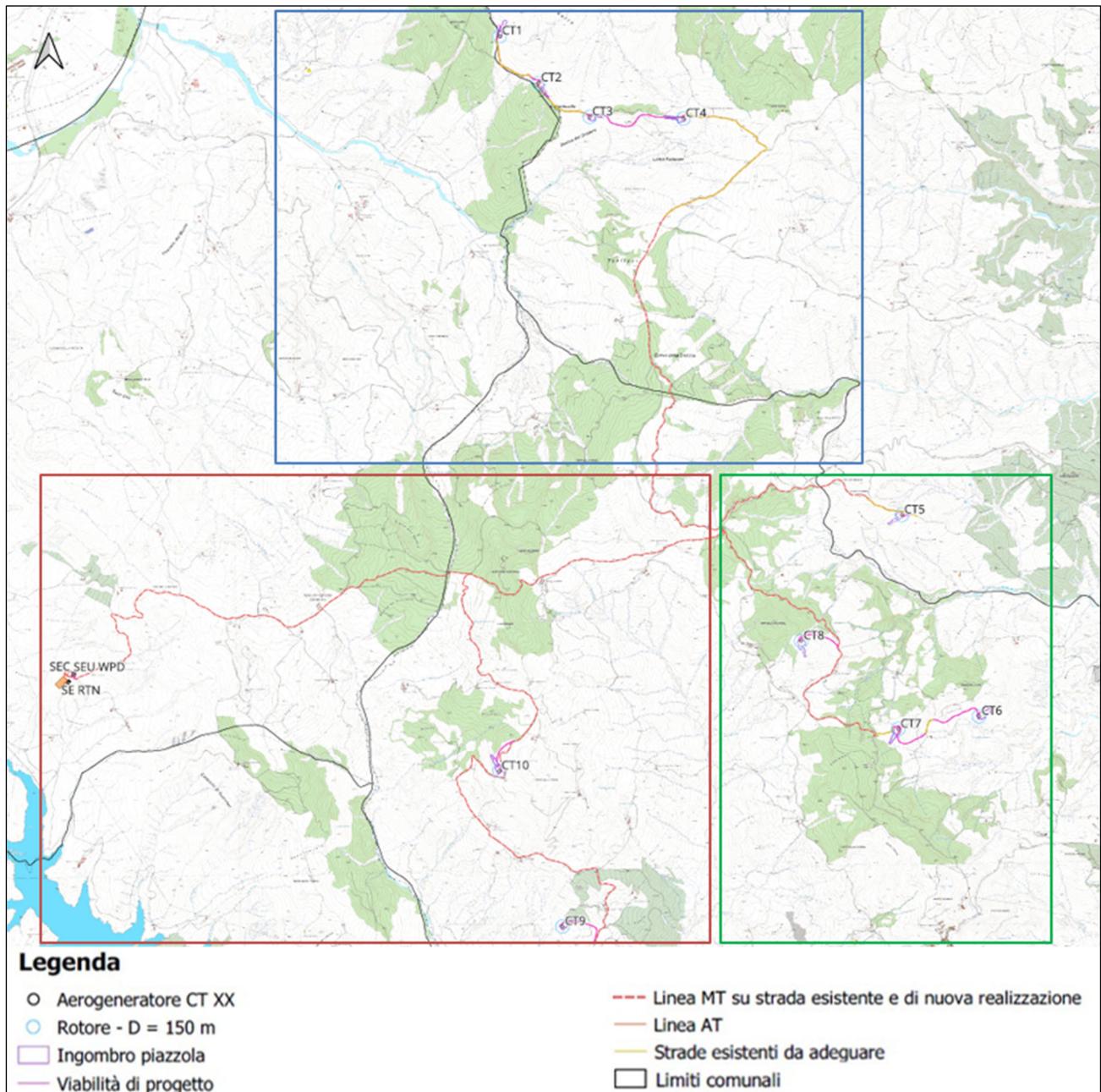


Figura 3.3: Layout d’impianto suddiviso in zone su CTR: Zona 1 - rettangolo rosso, Zona 2 - rettangolo azzurro, Zona 3 - rettangolo verde

Le turbine eoliche sono collegate mediante un sistema di linee elettriche interrate di Media Tensione a 30 kV allocate prevalentemente in corrispondenza del sistema di viabilità interna, necessario alla costruzione e alla gestione futura dell’impianto e realizzato prevalentemente adeguando il sistema viario esistente e realizzando nuovi tratti di raccordo per consentire il transito dei mezzi eccezionali.

Le linee elettriche in Media Tensione vengono collegate alla SEU 150/30 kV, posizionata ad Ovest rispetto agli aerogeneratori di progetto.

La soluzione di connessione (Soluzione Tecnica Minima Generale STMG - Codice Pratica (CP) del preventivo di connessione 202000607 del 08.07.2020) prevede che l’impianto eolico venga collegato in

antenna a 150 kV su una nuova Stazione Elettrica (SE) di smistamento a 150 kV della RTN nel Comune di Sant'Arcangelo, da inserire in doppio entra – esce alle linee RTN a 150 kV “Aliano – Senise” e “Pisticci – Rotonda”.

Il Gestore ha, inoltre, prescritto che lo stallo assegnato dovrà essere condiviso con altri produttori e, pertanto, la SEU 150/30 kV sarà realizzata all'interno di una stazione in comune con altri produttori e collegata alla Stazione Elettrica RTN Terna mediante una linea in Alta Tensione a 150 kV interrata

4. STUDI CONDOTTI SUGLI INCIDENTI

Esistono una serie di studi in merito alla probabilità di verificarsi un incidente dovuto al distacco di una pala o di una parte della stessa.

In particolare, un primo studio danese è stato condotto tra il 1998 ed il 1999, ha riguardato 2130 rotori, le rispettive pale e navicelle per un totale di 18 mesi, ovvero $1.5 \times 2130 = 3195$ anni di funzionamento e produzione totale di 540 MW.

In queste condizioni si sono verificati 7 incidenti in 3195 anni di funzionamento, equivalenti a 1 incidente ogni $3195/7 = 456$ anni.

Come si evince dallo studio, la probabilità di incidente è di per sé molto bassa e la probabilità che l'incidente arrechi danno a persone è molto più bassa se si tiene conto della bassissima probabilità di occupazione di 1 m² di terreno da parte di una persona, soprattutto in ambito rurale.

Un ulteriore studio danese conferma l'esito del primo; relativamente ad un periodo di 120 mesi nel decennio 1993 – 2013 e a 1912 rotori, rispettive pale e navicelle, la probabilità di rottura riguarda 0.00083 impianti all'anno ed in ambito rurale la stessa diventa 6×10^{-5} all'anno.

In generale la frequenza con cui si verificano tali incidenti è ulteriormente diminuita nell'ultimo decennio grazie ad un crescente sviluppo tecnologico delle macchine ed ai relativi sistemi di sicurezza.

5. CAUSE DI ROTTURA DELLA PALA O DI PARTE DI ESSA

Nell'ambito della progettazione ed esercizio di un impianto eolico uno degli aspetti da tenere in considerazione è la rottura accidentale di una pala o di parte della stessa; tuttavia, eventi di questo genere sono da considerarsi piuttosto rari, in quanto risulta essere bassa sia la probabilità del verificarsi degli stessi che eventuali conseguenze sfavorevoli nel caso dovessero avvenire.

I rischi di rottura dipendono essenzialmente da:

- 1) masse di ghiaccio che si formano sull'elemento rotante;
- 2) rottura meccanica dell'elemento rotante;

3) verificarsi di fulminazioni.

Nella presente trattazione la prima causa può essere ritenuta trascurabile, date le condizioni meteorologiche presenti nella zona interessata dagli aerogeneratori del parco eolico in questione.

La seconda causa di malfunzionamento può ritenersi un evento molto raro in quanto:

1. ogni singolo aerogeneratore è dotato di un sistema di controllo e supervisione delle pale, in grado di gestire, in maniera automatica, in tempo reale ed a distanza, una serie di funzioni quali l'avvio, l'arresto in ogni condizione di emergenza, la produzione. Tale sistema è in grado di assicurare la protezione della singola turbina e di funzionare in maniera del tutto autonoma;
2. ogni singola pala è connessa al mozzo tramite un collegamento rigido, in modo quasi da azzerare la probabilità di distacco della pala o di parte della stessa;
3. le singole pale sono progettate utilizzando materiali in fibra di vetro e carbonio, rivestite con altri materiali quali poliestere o fibre epossidiche, che contribuiscono ad abbassare ulteriormente la probabilità di distacco;
4. un minuzioso programma di manutenzione assicura per la singola pala la verifica di eventuali piccole fratture, in presenza delle quali si opta per la riparazione o eventuale sostituzione del pezzo danneggiato.

Rispetto alle due cause discusse, quella che più frequentemente potrebbe verificarsi riguarda le fulminazioni.

Per ovviare a questa problematica il sistema torre tubolare – navicella - rotore viene protetto con parafulmini e, in conformità alla norma CEI 81-1, la classe di protezione è la Classe I, la più alta, che garantisce in termini probabilistici una protezione del 98 %.

Questo implica che solo nel 2 % dei casi si possono avere danni della turbina nel caso la fulminazione.

In conseguenza di queste considerazioni si può ritenere che la probabilità che si verifichi una rottura accidentale del sistema è trascurabile.

6. STUDIO DELLA GITTATA

Ai fini della valutazione del fattore di rischio dovuto al distacco della pala o di parte di essa, si rende necessario la valutazione della stima della gittata massima dell'oggetto in questione.

In tal caso si prende in considerazione il moto detto comunemente "a giavellotto".

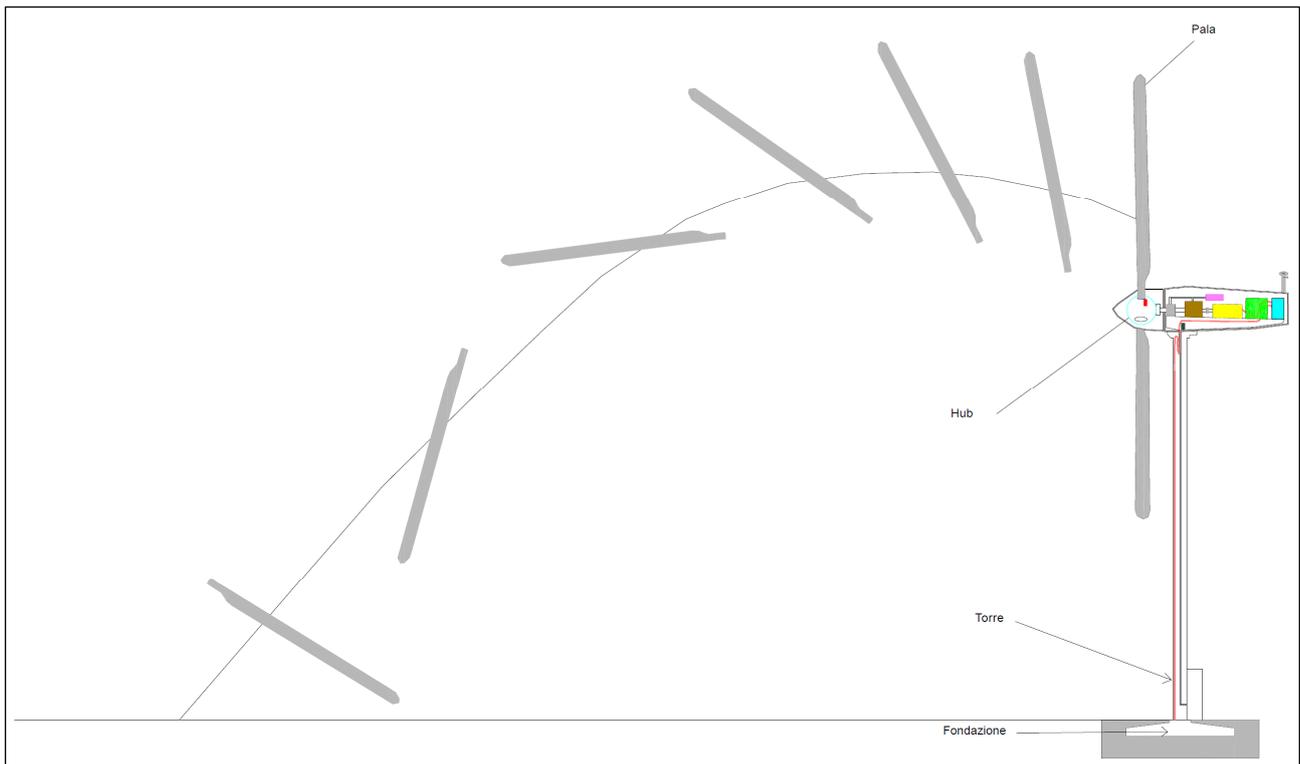


Figura 6.1: Traiettoria teorica pala in caso di rottura

Tuttavia, la situazione appena descritta è solo teorica e con probabilità di verificarsi quasi nulla; infatti, in situazioni reali subentrano alcune forze, quale quella di resistenza viscosa, quella di resistenza del vento, che si oppongono al moto della pala o di un frammento della stessa, riducendo la distanza di volo ed il tempo di volo.

Di seguito si discute appunto del tempo e della distanza di volo e di alcune relative considerazioni in quanto necessarie ai fini del calcolo della gittata massima.

Al momento del distacco la **traiettoria di volo** iniziale della pala o parte della stessa distaccata è determinata principalmente dall'angolo che la stessa traiettoria forma con l'asse orizzontale, oltre che dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia.

Il **tempo di volo** è il tempo che intercorre tra il distacco della pala o parte della stessa e il suo successivo impatto al suolo.

Esso dipende prevalentemente da:

- dalla posizione della pala o di parte della stessa rispetto al suolo;
- dalla componente verticale della velocità iniziale della pala o di parte della stessa, valutata in corrispondenza del suo baricentro ed immediatamente dopo il distacco;
- dall'accelerazione verticale della pala o di parte della stessa;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala o su parte della stessa.

La **distanza percorsa** dalla pala o di parte della stessa è la distanza orizzontale durante il tempo di volo.

Essa dipende prevalentemente da:

- velocità del vento nel momento in cui avviene la rottura ed il conseguente distacco;
- componente orizzontale della velocità iniziale della pala o di parte della stessa, valutata in corrispondenza del suo baricentro ed immediatamente dopo il distacco;
- tempo di volo;
- forze di attrito agenti sulla pala o su parte della stessa.

7. ANALISI TEORICA DEL MOTO DI ROTAZIONE COMPLESSO

Come precedentemente accennato, il caso di moto “a giavellotto” in seguito a rottura della pala o di parte della stessa risulta essere meramente teorico con probabilità trascurabile di verificarsi, date le caratteristiche aerodinamiche della pala, il suo peso ed a causa di fattori esterni quali l’azione del vento. Inoltre, esso non tiene conto delle condizioni iniziali esistenti al momento dell’eventuale distacco quali rollio, l’imbarcata ed il beccheggio della pala.

Sulla scorta di tali considerazioni, il modello che meglio approssima la situazione reale del moto della pala o di un suo frammento è il moto rotazionale complesso, che permette di tenere in considerazione i moti di rotazione intorno ai tre assi cartesiani.

Nel caso di rottura, per il principio della conservazione della quantità di moto, l’elemento distaccato tende a ruotare intorno all’asse ortogonale al piano della pala.

Le azioni indotte dal vento incidente sull’elemento distaccato determinano la rotazione intorno agli altri assi, generando altri due momenti intorno ad essi.

Inoltre, l’angolo di distacco e le forze inerziali agenti sulla pala o sul frammento della stessa determinano la traiettoria iniziale.

In merito sono stati condotti una serie di studi commissionati dalle aziende produttrici, i cui risultati ottenuti impongono due considerazioni in merito al valore della gittata calcolato:

1. il valore della gittata, indipendentemente dall’ipotesi effettuata sul moto della pala o di un suo frammento, dipende dalla velocità di rotazione massima a regime in maniera più marcata rispetto alla sua dipendenza dalle dimensioni;
2. nell’ipotesi di moto rotazionale complesso, il valore ottenuto della gittata è inferiore rispetto a quello che si ottiene nell’ipotesi di non considerare il moto come rotazionale complesso, ma di condurre un’analisi di moto dipendente solo da valori cinematici e geometrici.

Tutto ciò porta alla valutazione della gittata nel caso di moto dipendente solo da valori cinematici e

geometrici, essendo tale grandezza superiore rispetto all'ipotesi di moto rotazionale complesso.

8. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DELLA PALA

In questa parte di trattazione si intende valutare la gittata massima di una pala distaccata considerando solo parametri cinematici e geometrici per l'aerogeneratore di progetto.

In particolare, si analizza il moto bidimensionale parabolico della pala tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, quali le forze di attrito dell'aria e quelle del vento; i risultati ottenuti possono essere estesi a qualsiasi piano contenente la direzione di distacco della pala data la simmetria cilindrica del problema.

Dette x_0, y_0 le coordinate iniziali della pala al momento del distacco e considerati l'asse delle Y positivo verso l'alto e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale della pala, le componenti dell'accelerazione saranno:

$$a_x = 0$$

$$a_y = -g$$

$$\text{essendo } g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Per le ipotesi fatte

$$x = x_0 + v_{x0} t \quad (1)$$

$$y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{y0} t + y_0 \quad (2)$$

Dalla relazione (1)

$$t = (x - x_0) / v_{x0}$$

Sostituendo tale ultimo valore nella relazione (2) si ottiene

$$y(x) = \frac{-g(x-x_0)^2}{2v_{x0}^2} + \frac{v_{y0}}{v_{x0}}(x-x_0) + y_0 \quad (3)$$

Detto θ l'angolo di distacco, ovvero l'angolo formato dal vettore che definisce la distanza del centro di massa della pala dal centro del mozzo e l'asse orizzontale, le componenti del modulo della velocità v_0 lungo x e y valgono rispettivamente:

$$v_{x0} = v_0 \sin\theta$$

$$v_{y0} = v_0 \cos\theta$$

Inoltre, al fine di determinare la traiettoria, si assume di studiare il moto del centro di massa della pala.

Detta L la lunghezza della pala e D il diametro rotorico, il centro di massa della pala si trova ad una distanza dal centro del mozzo pari a:

$$r_c = \frac{D-2L}{2} + \frac{1}{3} L$$

Detta H l'altezza dell'aerogeneratore al centro del mozzo, le coordinate iniziali della pala al momento del distacco possono essere espresse come segue:

$$x_0 = -r_c \cos \theta$$

$$y_0 = H + r_c \sin \theta = H + \left(\frac{D-2L}{2} + \frac{1}{3} L \right) \sin \theta$$

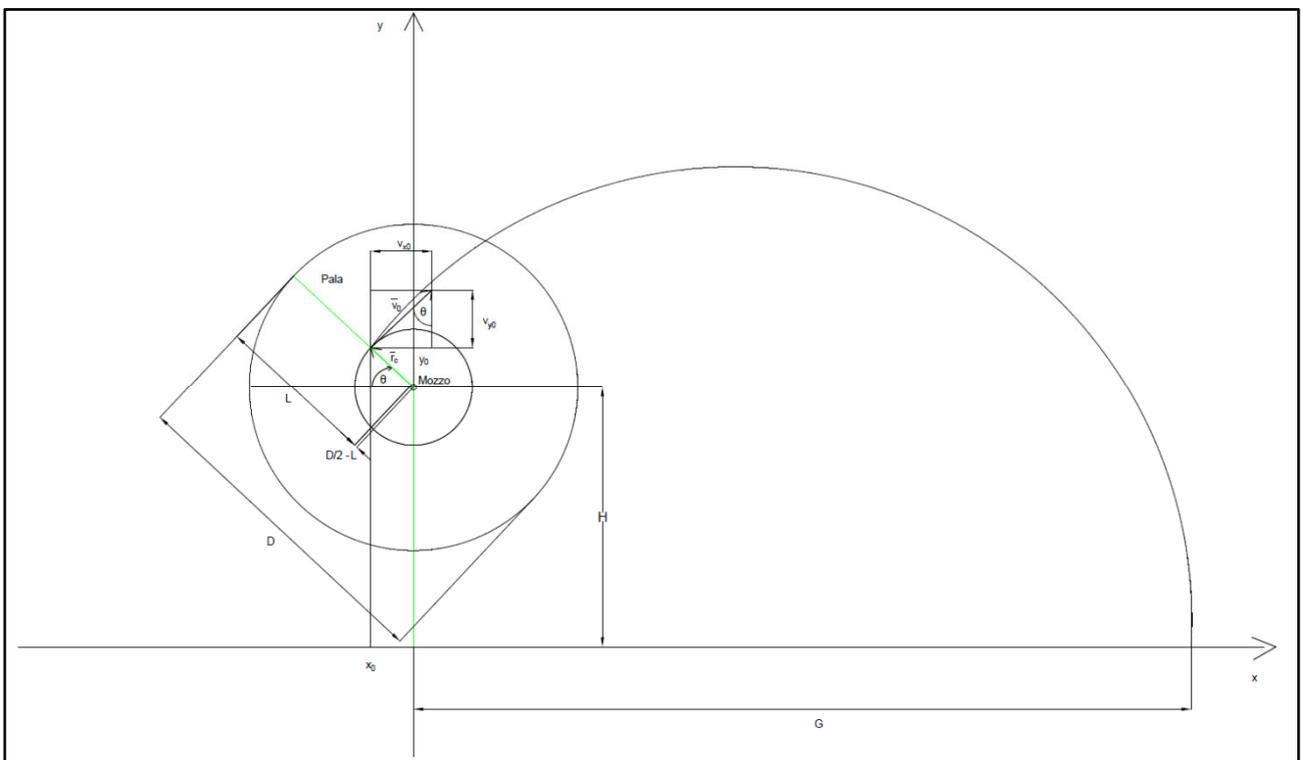


Figura 8.1: Rappresentazione geometrica del problema

Imponendo $y = 0$ nella relazione (3), tenendo conto delle espressioni delle coordinate iniziali e delle componenti orizzontale e verticale della velocità iniziale della pala e risolvendo rispetto a x , si ottiene l'espressione della gittata nel caso bidimensionale

$$G(\theta) = \frac{v_0 \sin \theta}{g} \sqrt{v_0^2 \cos^2 \theta + 2 g r_c \sin \theta + 2 g H} - r_c \cos \theta + \frac{v_0^2}{g} \cos \theta \sin \theta$$

Dall'analisi svolta la gittata relativa alla pala dipende dai parametri θ , H , D , L e v_0 .

Considerando i dati tecnici dell'aerogeneratore di progetto (**Tabella 2.1**), la frequenza massima di rotazione del rotore è pari a 10,12 giri/min.

Detta ω la velocità angolare massima di esercizio, la velocità massima di distacco della pala (m/s) è

data da

$$v_0 = \omega r_c = \frac{2 \pi \text{rpm}}{60} r_c$$

In definitiva, si assumono le seguenti ipotesi:

- $a_x = 0$ e $a_y = -g = -9,8 \text{ m/s}^2$;
- le forze di resistenza dell'aria sono trascurate;
- $v_0 = 27,55 \text{ m/s}$, $r_c = 26,0 \text{ m}$, $\text{rpm}_{\text{max}} = 10,12 \text{ giri/min}$;
- $H = 125 \text{ m}$, $L = 73,5 \text{ m}$, $D = 150 \text{ m}$.

La tabella seguente fornisce i principali risultati del calcolo della gittata.

q [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	v_{x0} [m/s]	v_{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata [G] [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
0	-26,00	125,00	0,00	27,55	-26,00	23,00	26,00	75,00
1	-26,00	125,45	0,48	27,55	-21,86	27,14	21,86	70,86
2	-25,98	125,91	0,96	27,54	-17,71	31,29	17,71	66,71
3	-25,96	126,36	1,44	27,52	-13,55	35,45	13,55	62,55
4	-25,94	126,81	1,92	27,49	-9,38	39,62	9,38	58,38
5	-25,90	127,27	2,40	27,45	-5,21	43,79	5,21	54,21
6	-25,86	127,72	2,88	27,40	-1,04	47,96	1,04	50,04
7	-25,81	128,17	3,36	27,35	3,13	52,13	3,13	52,13
8	-25,75	128,62	3,83	27,29	7,29	56,29	7,29	56,29
9	-25,68	129,07	4,31	27,21	11,44	60,44	11,44	60,44
10	-25,61	129,51	4,78	27,14	15,58	64,58	15,58	64,58
11	-25,52	129,96	5,26	27,05	19,71	68,71	19,71	68,71
12	-25,43	130,41	5,73	26,95	23,81	72,81	23,81	72,81
13	-25,33	130,85	6,20	26,85	27,90	76,90	27,90	76,90
14	-25,23	131,29	6,67	26,74	31,96	80,96	31,96	80,96
15	-25,11	131,73	7,13	26,61	36,00	85,00	36,00	85,00
16	-24,99	132,17	7,59	26,49	40,00	89,00	40,00	89,00
17	-24,86	132,60	8,06	26,35	43,97	92,97	43,97	92,97
18	-24,73	133,03	8,51	26,21	47,91	96,91	47,91	96,91
19	-24,58	133,46	8,97	26,05	51,81	100,81	51,81	100,81
20	-24,43	133,89	9,42	25,89	55,66	104,66	55,66	104,66
21	-24,27	134,32	9,87	25,72	59,48	108,48	59,48	108,48
22	-24,11	134,74	10,32	25,55	63,25	112,25	63,25	112,25
23	-23,93	135,16	10,77	25,36	66,97	115,97	66,97	115,97
24	-23,75	135,58	11,21	25,17	70,64	119,64	70,64	119,64

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
25	-23,56	135,99	11,64	24,97	74,25	123,25	74,25	123,25
26	-23,37	136,40	12,08	24,77	77,82	126,82	77,82	126,82
27	-23,17	136,80	12,51	24,55	81,32	130,32	81,32	130,32
28	-22,96	137,21	12,94	24,33	84,77	133,77	84,77	133,77
29	-22,74	137,61	13,36	24,10	88,15	137,15	88,15	137,15
30	-22,52	138,00	13,78	23,86	91,47	140,47	91,47	140,47
31	-22,29	138,39	14,19	23,62	94,73	143,73	94,73	143,73
32	-22,05	138,78	14,60	23,37	97,91	146,91	97,91	146,91
33	-21,81	139,16	15,01	23,11	101,03	150,03	101,03	150,03
34	-21,55	139,54	15,41	22,84	104,08	153,08	104,08	153,08
35	-21,30	139,91	15,80	22,57	107,06	156,06	107,06	156,06
36	-21,03	140,28	16,20	22,29	109,97	158,97	109,97	158,97
37	-20,76	140,65	16,58	22,01	112,80	161,80	112,80	161,80
38	-20,49	141,01	16,96	21,71	115,55	164,55	115,55	164,55
39	-20,21	141,36	17,34	21,41	118,23	167,23	118,23	167,23
40	-19,92	141,71	17,71	21,11	120,83	169,83	120,83	169,83
41	-19,62	142,06	18,08	20,80	123,35	172,35	123,35	172,35
42	-19,32	142,40	18,44	20,48	125,80	174,80	125,80	174,80
43	-19,02	142,73	18,79	20,15	128,16	177,16	128,16	177,16
44	-18,70	143,06	19,14	19,82	130,44	179,44	130,44	179,44
45	-18,38	143,38	19,48	19,48	132,64	181,64	132,64	181,64
46	-18,06	143,70	19,82	19,14	134,76	183,76	134,76	183,76
47	-17,73	144,02	20,15	18,79	136,79	185,79	136,79	185,79
48	-17,40	144,32	20,48	18,44	138,74	187,74	138,74	187,74
49	-17,06	144,62	20,80	18,08	140,61	189,61	140,61	189,61
50	-16,71	144,92	21,11	17,71	142,40	191,40	142,40	191,40
51	-16,36	145,21	21,41	17,34	144,10	193,10	144,10	193,10
52	-16,01	145,49	21,71	16,96	145,72	194,72	145,72	194,72
53	-15,65	145,76	22,01	16,58	147,25	196,25	147,25	196,25
54	-15,28	146,03	22,29	16,20	148,71	197,71	148,71	197,71
55	-14,91	146,30	22,57	15,80	150,08	199,08	150,08	199,08
56	-14,54	146,55	22,84	15,41	151,36	200,36	151,36	200,36
57	-14,16	146,81	23,11	15,01	152,57	201,57	152,57	201,57
58	-13,78	147,05	23,37	14,60	153,70	202,70	153,70	202,70
59	-13,39	147,29	23,62	14,19	154,74	203,74	154,74	203,74
60	-13,00	147,52	23,86	13,78	155,70	204,70	155,70	204,70

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
61	-12,61	147,74	24,10	13,36	156,59	205,59	156,59	205,59
62	-12,21	147,96	24,33	12,94	157,40	206,40	157,40	206,40
63	-11,80	148,17	24,55	12,51	158,13	207,13	158,13	207,13
64	-11,40	148,37	24,77	12,08	158,78	207,78	158,78	207,78
65	-10,99	148,56	24,97	11,64	159,35	208,35	159,35	208,35
66	-10,58	148,75	25,17	11,21	159,86	208,86	159,86	208,86
67	-10,16	148,93	25,36	10,77	160,29	209,29	160,29	209,29
68	-9,74	149,11	25,55	10,32	160,64	209,64	160,64	209,64
69	-9,32	149,27	25,72	9,87	160,93	209,93	160,93	209,93
70	-8,89	149,43	25,89	9,42	161,14	210,14	161,14	210,14
71	-8,46	149,58	26,05	8,97	161,29	210,29	161,29	210,29
72	-8,03	149,73	26,21	8,51	161,37	210,37	161,37	210,37
73	-7,60	149,86	26,35	8,06	161,38	210,38	161,38	210,38
74	-7,17	149,99	26,49	7,59	161,33	210,33	161,33	210,33
75	-6,73	150,11	26,61	7,13	161,22	210,22	161,22	210,22
76	-6,29	150,23	26,74	6,67	161,04	210,04	161,04	210,04
77	-5,85	150,33	26,85	6,20	160,81	209,81	160,81	209,81
78	-5,41	150,43	26,95	5,73	160,51	209,51	160,51	209,51
79	-4,96	150,52	27,05	5,26	160,16	209,16	160,16	209,16
80	-4,51	150,61	27,14	4,78	159,75	208,75	159,75	208,75
81	-4,07	150,68	27,21	4,31	159,29	208,29	159,29	208,29
82	-3,62	150,75	27,29	3,83	158,78	207,78	158,78	207,78
83	-3,17	150,81	27,35	3,36	158,21	207,21	158,21	207,21
84	-2,72	150,86	27,40	2,88	157,60	206,60	157,60	206,60
85	-2,27	150,90	27,45	2,40	156,94	205,94	156,94	205,94
86	-1,81	150,94	27,49	1,92	156,23	205,23	156,23	205,23
87	-1,36	150,96	27,52	1,44	155,47	204,47	155,47	204,47
88	-0,91	150,98	27,54	0,96	154,68	203,68	154,68	203,68
89	-0,45	151,00	27,55	0,48	153,84	202,84	153,84	202,84
90	0,00	151,00	27,55	0,00	152,96	201,96	152,96	201,96
91	0,45	151,00	27,55	-0,48	152,04	201,04	152,04	201,04
92	0,91	150,98	27,54	-0,96	151,09	200,09	151,09	200,09
93	1,36	150,96	27,52	-1,44	150,10	199,10	150,10	199,10
94	1,81	150,94	27,49	-1,92	149,07	198,07	149,07	198,07
95	2,27	150,90	27,45	-2,40	148,01	197,01	148,01	197,01
96	2,72	150,86	27,40	-2,88	146,93	195,93	146,93	195,93

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
97	3,17	150,81	27,35	-3,36	145,81	194,81	145,81	194,81
98	3,62	150,75	27,29	-3,83	144,66	193,66	144,66	193,66
99	4,07	150,68	27,21	-4,31	143,49	192,49	143,49	192,49
100	4,51	150,61	27,14	-4,78	142,29	191,29	142,29	191,29
101	4,96	150,52	27,05	-5,26	141,06	190,06	141,06	190,06
102	5,41	150,43	26,95	-5,73	139,81	188,81	139,81	188,81
103	5,85	150,33	26,85	-6,20	138,54	187,54	138,54	187,54
104	6,29	150,23	26,74	-6,67	137,25	186,25	137,25	186,25
105	6,73	150,11	26,61	-7,13	135,94	184,94	135,94	184,94
106	7,17	149,99	26,49	-7,59	134,61	183,61	134,61	183,61
107	7,60	149,86	26,35	-8,06	133,27	182,27	133,27	182,27
108	8,03	149,73	26,21	-8,51	131,90	180,90	131,90	180,90
109	8,46	149,58	26,05	-8,97	130,52	179,52	130,52	179,52
110	8,89	149,43	25,89	-9,42	129,13	178,13	129,13	178,13
111	9,32	149,27	25,72	-9,87	127,72	176,72	127,72	176,72
112	9,74	149,11	25,55	-10,32	126,31	175,31	126,31	175,31
113	10,16	148,93	25,36	-10,77	124,88	173,88	124,88	173,88
114	10,58	148,75	25,17	-11,21	123,44	172,44	123,44	172,44
115	10,99	148,56	24,97	-11,64	121,98	170,98	121,98	170,98
116	11,40	148,37	24,77	-12,08	120,53	169,53	120,53	169,53
117	11,80	148,17	24,55	-12,51	119,06	168,06	119,06	168,06
118	12,21	147,96	24,33	-12,94	117,58	166,58	117,58	166,58
119	12,61	147,74	24,10	-13,36	116,10	165,10	116,10	165,10
120	13,00	147,52	23,86	-13,78	114,61	163,61	114,61	163,61
121	13,39	147,29	23,62	-14,19	113,12	162,12	113,12	162,12
122	13,78	147,05	23,37	-14,60	111,62	160,62	111,62	160,62
123	14,16	146,81	23,11	-15,01	110,12	159,12	110,12	159,12
124	14,54	146,55	22,84	-15,41	108,61	157,61	108,61	157,61
125	14,91	146,30	22,57	-15,80	107,10	156,10	107,10	156,10
126	15,28	146,03	22,29	-16,20	105,59	154,59	105,59	154,59
127	15,65	145,76	22,01	-16,58	104,08	153,08	104,08	153,08
128	16,01	145,49	21,71	-16,96	102,56	151,56	102,56	151,56
129	16,36	145,21	21,41	-17,34	101,04	150,04	101,04	150,04
130	16,71	144,92	21,11	-17,71	99,53	148,53	99,53	148,53
131	17,06	144,62	20,80	-18,08	98,01	147,01	98,01	147,01
132	17,40	144,32	20,48	-18,44	96,49	145,49	96,49	145,49

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
133	17,73	144,02	20,15	-18,79	94,97	143,97	94,97	143,97
134	18,06	143,70	19,82	-19,14	93,45	142,45	93,45	142,45
135	18,38	143,38	19,48	-19,48	91,94	140,94	91,94	140,94
136	18,70	143,06	19,14	-19,82	90,42	139,42	90,42	139,42
137	19,02	142,73	18,79	-20,15	88,91	137,91	88,91	137,91
138	19,32	142,40	18,44	-20,48	87,39	136,39	87,39	136,39
139	19,62	142,06	18,08	-20,80	85,88	134,88	85,88	134,88
140	19,92	141,71	17,71	-21,11	84,37	133,37	84,37	133,37
141	20,21	141,36	17,34	-21,41	82,87	131,87	82,87	131,87
142	20,49	141,01	16,96	-21,71	81,36	130,36	81,36	130,36
143	20,76	140,65	16,58	-22,01	79,86	128,86	79,86	128,86
144	21,03	140,28	16,20	-22,29	78,36	127,36	78,36	127,36
145	21,30	139,91	15,80	-22,57	76,86	125,86	76,86	125,86
146	21,55	139,54	15,41	-22,84	75,36	124,36	75,36	124,36
147	21,81	139,16	15,01	-23,11	73,87	122,87	73,87	122,87
148	22,05	138,78	14,60	-23,37	72,38	121,38	72,38	121,38
149	22,29	138,39	14,19	-23,62	70,90	119,90	70,90	119,90
150	22,52	138,00	13,78	-23,86	69,41	118,41	69,41	118,41
151	22,74	137,61	13,36	-24,10	67,93	116,93	67,93	116,93
152	22,96	137,21	12,94	-24,33	66,45	115,45	66,45	115,45
153	23,17	136,80	12,51	-24,55	64,98	113,98	64,98	113,98
154	23,37	136,40	12,08	-24,77	63,51	112,51	63,51	112,51
155	23,56	135,99	11,64	-24,97	62,04	111,04	62,04	111,04
156	23,75	135,58	11,21	-25,17	60,57	109,57	60,57	109,57
157	23,93	135,16	10,77	-25,36	59,11	108,11	59,11	108,11
158	24,11	134,74	10,32	-25,55	57,64	106,64	57,64	106,64
159	24,27	134,32	9,87	-25,72	56,19	105,19	56,19	105,19
160	24,43	133,89	9,42	-25,89	54,73	103,73	54,73	103,73
161	24,58	133,46	8,97	-26,05	53,28	102,28	53,28	102,28
162	24,73	133,03	8,51	-26,21	51,83	100,83	51,83	100,83
163	24,86	132,60	8,06	-26,35	50,38	99,38	50,38	99,38
164	24,99	132,17	7,59	-26,49	48,93	97,93	48,93	97,93
165	25,11	131,73	7,13	-26,61	47,49	96,49	47,49	96,49
166	25,23	131,29	6,67	-26,74	46,05	95,05	46,05	95,05
167	25,33	130,85	6,20	-26,85	44,61	93,61	44,61	93,61
168	25,43	130,41	5,73	-26,95	43,17	92,17	43,17	92,17

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
169	25,52	129,96	5,26	-27,05	41,73	90,73	41,73	90,73
170	25,61	129,51	4,78	-27,14	40,30	89,30	40,30	89,30
171	25,68	129,07	4,31	-27,21	38,86	87,86	38,86	87,86
172	25,75	128,62	3,83	-27,29	37,43	86,43	37,43	86,43
173	25,81	128,17	3,36	-27,35	36,00	85,00	36,00	85,00
174	25,86	127,72	2,88	-27,40	34,57	83,57	34,57	83,57
175	25,90	127,27	2,40	-27,45	33,14	82,14	33,14	82,14
176	25,94	126,81	1,92	-27,49	31,71	80,71	31,71	80,71
177	25,96	126,36	1,44	-27,52	30,28	79,28	30,28	79,28
178	25,98	125,91	0,96	-27,54	28,86	77,86	28,86	77,86
179	26,00	125,45	0,48	-27,55	27,43	76,43	27,43	76,43
180	26,00	125,00	0,00	-27,55	26,00	75,00	26,00	75,00
181	26,00	124,55	-0,48	-27,55	24,57	73,57	24,57	73,57
182	25,98	124,09	-0,96	-27,54	23,14	72,14	23,14	72,14
183	25,96	123,64	-1,44	-27,52	21,71	70,71	21,71	70,71
184	25,94	123,19	-1,92	-27,49	20,29	69,29	20,29	69,29
185	25,90	122,73	-2,40	-27,45	18,85	67,85	18,85	67,85
186	25,86	122,28	-2,88	-27,40	17,42	66,42	17,42	66,42
187	25,81	121,83	-3,36	-27,35	15,99	64,99	15,99	64,99
188	25,75	121,38	-3,83	-27,29	14,55	63,55	14,55	63,55
189	25,68	120,93	-4,31	-27,21	13,12	62,12	13,12	62,12
190	25,61	120,49	-4,78	-27,14	11,68	60,68	11,68	60,68
191	25,52	120,04	-5,26	-27,05	10,24	59,24	10,24	59,24
192	25,43	119,59	-5,73	-26,95	8,80	57,80	8,80	57,80
193	25,33	119,15	-6,20	-26,85	7,35	56,35	7,35	56,35
194	25,23	118,71	-6,67	-26,74	5,90	54,90	5,90	54,90
195	25,11	118,27	-7,13	-26,61	4,45	53,45	4,45	53,45
196	24,99	117,83	-7,59	-26,49	2,99	51,99	2,99	51,99
197	24,86	117,40	-8,06	-26,35	1,53	50,53	1,53	50,53
198	24,73	116,97	-8,51	-26,21	0,07	49,07	0,07	49,07
199	24,58	116,54	-8,97	-26,05	-1,39	47,61	1,39	50,39
200	24,43	116,11	-9,42	-25,89	-2,86	46,14	2,86	51,86
201	24,27	115,68	-9,87	-25,72	-4,34	44,66	4,34	53,34
202	24,11	115,26	-10,32	-25,55	-5,82	43,18	5,82	54,82
203	23,93	114,84	-10,77	-25,36	-7,30	41,70	7,30	56,30
204	23,75	114,42	-11,21	-25,17	-8,79	40,21	8,79	57,79

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
205	23,56	114,01	-11,64	-24,97	-10,29	38,71	10,29	59,29
206	23,37	113,60	-12,08	-24,77	-11,79	37,21	11,79	60,79
207	23,17	113,20	-12,51	-24,55	-13,30	35,70	13,30	62,30
208	22,96	112,79	-12,94	-24,33	-14,81	34,19	14,81	63,81
209	22,74	112,39	-13,36	-24,10	-16,33	32,67	16,33	65,33
210	22,52	112,00	-13,78	-23,86	-17,85	31,15	17,85	66,85
211	22,29	111,61	-14,19	-23,62	-19,39	29,61	19,39	68,39
212	22,05	111,22	-14,60	-23,37	-20,93	28,07	20,93	69,93
213	21,81	110,84	-15,01	-23,11	-22,47	26,53	22,47	71,47
214	21,55	110,46	-15,41	-22,84	-24,03	24,97	24,03	73,03
215	21,30	110,09	-15,80	-22,57	-25,59	23,41	25,59	74,59
216	21,03	109,72	-16,20	-22,29	-27,16	21,84	27,16	76,16
217	20,76	109,35	-16,58	-22,01	-28,74	20,26	28,74	77,74
218	20,49	108,99	-16,96	-21,71	-30,32	18,68	30,32	79,32
219	20,21	108,64	-17,34	-21,41	-31,92	17,08	31,92	80,92
220	19,92	108,29	-17,71	-21,11	-33,52	15,48	33,52	82,52
221	19,62	107,94	-18,08	-20,80	-35,13	13,87	35,13	84,13
222	19,32	107,60	-18,44	-20,48	-36,75	12,25	36,75	85,75
223	19,02	107,27	-18,79	-20,15	-38,38	10,62	38,38	87,38
224	18,70	106,94	-19,14	-19,82	-40,02	8,98	40,02	89,02
225	18,38	106,62	-19,48	-19,48	-41,67	7,33	41,67	90,67
226	18,06	106,30	-19,82	-19,14	-43,33	5,67	43,33	92,33
227	17,73	105,98	-20,15	-18,79	-45,00	4,00	45,00	94,00
228	17,40	105,68	-20,48	-18,44	-46,68	2,32	46,68	95,68
229	17,06	105,38	-20,80	-18,08	-48,37	0,63	48,37	97,37
230	16,71	105,08	-21,11	-17,71	-50,07	-1,07	50,07	99,07
231	16,36	104,79	-21,41	-17,34	-51,78	-2,78	51,78	100,78
232	16,01	104,51	-21,71	-16,96	-53,50	-4,50	53,50	102,50
233	15,65	104,24	-22,01	-16,58	-55,23	-6,23	55,23	104,23
234	15,28	103,97	-22,29	-16,20	-56,97	-7,97	56,97	105,97
235	14,91	103,70	-22,57	-15,80	-58,72	-9,72	58,72	107,72
236	14,54	103,45	-22,84	-15,41	-60,48	-11,48	60,48	109,48
237	14,16	103,19	-23,11	-15,01	-62,25	-13,25	62,25	111,25
238	13,78	102,95	-23,37	-14,60	-64,03	-15,03	64,03	113,03
239	13,39	102,71	-23,62	-14,19	-65,82	-16,82	65,82	114,82
240	13,00	102,48	-23,86	-13,78	-67,62	-18,62	67,62	116,62

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
241	12,61	102,26	-24,10	-13,36	-69,43	-20,43	69,43	118,43
242	12,21	102,04	-24,33	-12,94	-71,25	-22,25	71,25	120,25
243	11,80	101,83	-24,55	-12,51	-73,08	-24,08	73,08	122,08
244	11,40	101,63	-24,77	-12,08	-74,92	-25,92	74,92	123,92
245	10,99	101,44	-24,97	-11,64	-76,77	-27,77	76,77	125,77
246	10,58	101,25	-25,17	-11,21	-78,63	-29,63	78,63	127,63
247	10,16	101,07	-25,36	-10,77	-80,49	-31,49	80,49	129,49
248	9,74	100,89	-25,55	-10,32	-82,36	-33,36	82,36	131,36
249	9,32	100,73	-25,72	-9,87	-84,24	-35,24	84,24	133,24
250	8,89	100,57	-25,89	-9,42	-86,12	-37,12	86,12	135,12
251	8,46	100,42	-26,05	-8,97	-88,01	-39,01	88,01	137,01
252	8,03	100,27	-26,21	-8,51	-89,91	-40,91	89,91	138,91
253	7,60	100,14	-26,35	-8,06	-91,81	-42,81	91,81	140,81
254	7,17	100,01	-26,49	-7,59	-93,71	-44,71	93,71	142,71
255	6,73	99,89	-26,61	-7,13	-95,62	-46,62	95,62	144,62
256	6,29	99,77	-26,74	-6,67	-97,53	-48,53	97,53	146,53
257	5,85	99,67	-26,85	-6,20	-99,44	-50,44	99,44	148,44
258	5,41	99,57	-26,95	-5,73	-101,35	-52,35	101,35	150,35
259	4,96	99,48	-27,05	-5,26	-103,26	-54,26	103,26	152,26
260	4,51	99,39	-27,14	-4,78	-105,17	-56,17	105,17	154,17
261	4,07	99,32	-27,21	-4,31	-107,07	-58,07	107,07	156,07
262	3,62	99,25	-27,29	-3,83	-108,97	-59,97	108,97	157,97
263	3,17	99,19	-27,35	-3,36	-110,87	-61,87	110,87	159,87
264	2,72	99,14	-27,40	-2,88	-112,75	-63,75	112,75	161,75
265	2,27	99,10	-27,45	-2,40	-114,63	-65,63	114,63	163,63
266	1,81	99,06	-27,49	-1,92	-116,50	-67,50	116,50	165,50
267	1,36	99,04	-27,52	-1,44	-118,36	-69,36	118,36	167,36
268	0,91	99,02	-27,54	-0,96	-120,21	-71,21	120,21	169,21
269	0,45	99,00	-27,55	-0,48	-122,04	-73,04	122,04	171,04
270	0,00	99,00	-27,55	0,00	-123,85	-74,85	123,85	172,85
271	-0,45	99,00	-27,55	0,48	-125,65	-76,65	125,65	174,65
272	-0,91	99,02	-27,54	0,96	-127,43	-78,43	127,43	176,43
273	-1,36	99,04	-27,52	1,44	-129,18	-80,18	129,18	178,18
274	-1,81	99,06	-27,49	1,92	-130,91	-81,91	130,91	179,91
275	-2,27	99,10	-27,45	2,40	-132,62	-83,62	132,62	181,62
276	-2,72	99,14	-27,40	2,88	-134,30	-85,30	134,30	183,30

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
277	-3,17	99,19	-27,35	3,36	-135,94	-86,94	135,94	184,94
278	-3,62	99,25	-27,29	3,83	-137,56	-88,56	137,56	186,56
279	-4,07	99,32	-27,21	4,31	-139,15	-90,15	139,15	188,15
280	-4,51	99,39	-27,14	4,78	-140,69	-91,69	140,69	189,69
281	-4,96	99,48	-27,05	5,26	-142,20	-93,20	142,20	191,20
282	-5,41	99,57	-26,95	5,73	-143,67	-94,67	143,67	192,67
283	-5,85	99,67	-26,85	6,20	-145,10	-96,10	145,10	194,10
284	-6,29	99,77	-26,74	6,67	-146,48	-97,48	146,48	195,48
285	-6,73	99,89	-26,61	7,13	-147,81	-98,81	147,81	196,81
286	-7,17	100,01	-26,49	7,59	-149,10	-100,10	149,10	198,10
287	-7,60	100,14	-26,35	8,06	-150,33	-101,33	150,33	199,33
288	-8,03	100,27	-26,21	8,51	-151,51	-102,51	151,51	200,51
289	-8,46	100,42	-26,05	8,97	-152,64	-103,64	152,64	201,64
290	-8,89	100,57	-25,89	9,42	-153,71	-104,71	153,71	202,71
291	-9,32	100,73	-25,72	9,87	-154,71	-105,71	154,71	203,71
292	-9,74	100,89	-25,55	10,32	-155,66	-106,66	155,66	204,66
293	-10,16	101,07	-25,36	10,77	-156,54	-107,54	156,54	205,54
294	-10,58	101,25	-25,17	11,21	-157,35	-108,35	157,35	206,35
295	-10,99	101,44	-24,97	11,64	-158,09	-109,09	158,09	207,09
296	-11,40	101,63	-24,77	12,08	-158,77	-109,77	158,77	207,77
297	-11,80	101,83	-24,55	12,51	-159,37	-110,37	159,37	208,37
298	-12,21	102,04	-24,33	12,94	-159,89	-110,89	159,89	208,89
299	-12,61	102,26	-24,10	13,36	-160,34	-111,34	160,34	209,34
300	-13,00	102,48	-23,86	13,78	-160,71	-111,71	160,71	209,71
301	-13,39	102,71	-23,62	14,19	-161,01	-112,01	161,01	210,01
302	-13,78	102,95	-23,37	14,60	-161,22	-112,22	161,22	210,22
303	-14,16	103,19	-23,11	15,01	-161,34	-112,34	161,34	210,34
304	-14,54	103,45	-22,84	15,41	-161,39	-112,39	161,39	210,39
305	-14,91	103,70	-22,57	15,80	-161,34	-112,34	161,34	210,34
306	-15,28	103,97	-22,29	16,20	-161,21	-112,21	161,21	210,21
307	-15,65	104,24	-22,01	16,58	-160,99	-111,99	160,99	209,99
308	-16,01	104,51	-21,71	16,96	-160,68	-111,68	160,68	209,68
309	-16,36	104,79	-21,41	17,34	-160,28	-111,28	160,28	209,28
310	-16,71	105,08	-21,11	17,71	-159,79	-110,79	159,79	208,79
311	-17,06	105,38	-20,80	18,08	-159,20	-110,20	159,20	208,20
312	-17,40	105,68	-20,48	18,44	-158,52	-109,52	158,52	207,52

q [°]	x ₀ [m]	y ₀ [m]	v _{x0} [m/s]	v _{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
313	-17,73	105,98	-20,15	18,79	-157,75	-108,75	157,75	206,75
314	-18,06	106,30	-19,82	19,14	-156,88	-107,88	156,88	205,88
315	-18,38	106,62	-19,48	19,48	-155,91	-106,91	155,91	204,91
316	-18,70	106,94	-19,14	19,82	-154,85	-105,85	154,85	203,85
317	-19,02	107,27	-18,79	20,15	-153,70	-104,70	153,70	202,70
318	-19,32	107,60	-18,44	20,48	-152,44	-103,44	152,44	201,44
319	-19,62	107,94	-18,08	20,80	-151,09	-102,09	151,09	200,09
320	-19,92	108,29	-17,71	21,11	-149,65	-100,65	149,65	198,65
321	-20,21	108,64	-17,34	21,41	-148,11	-99,11	148,11	197,11
322	-20,49	108,99	-16,96	21,71	-146,47	-97,47	146,47	195,47
323	-20,76	109,35	-16,58	22,01	-144,73	-95,73	144,73	193,73
324	-21,03	109,72	-16,20	22,29	-142,91	-93,91	142,91	191,91
325	-21,30	110,09	-15,80	22,57	-140,98	-91,98	140,98	189,98
326	-21,55	110,46	-15,41	22,84	-138,97	-89,97	138,97	187,97
327	-21,81	110,84	-15,01	23,11	-136,86	-87,86	136,86	185,86
328	-22,05	111,22	-14,60	23,37	-134,65	-85,65	134,65	183,65
329	-22,29	111,61	-14,19	23,62	-132,36	-83,36	132,36	181,36
330	-22,52	112,00	-13,78	23,86	-129,98	-80,98	129,98	178,98
331	-22,74	112,39	-13,36	24,10	-127,51	-78,51	127,51	176,51
332	-22,96	112,79	-12,94	24,33	-124,95	-75,95	124,95	173,95
333	-23,17	113,20	-12,51	24,55	-122,30	-73,30	122,30	171,30
334	-23,37	113,60	-12,08	24,77	-119,58	-70,58	119,58	168,58
335	-23,56	114,01	-11,64	24,97	-116,76	-67,76	116,76	165,76
336	-23,75	114,42	-11,21	25,17	-113,87	-64,87	113,87	162,87
337	-23,93	114,84	-10,77	25,36	-110,90	-61,90	110,90	159,90
338	-24,11	115,26	-10,32	25,55	-107,85	-58,85	107,85	156,85
339	-24,27	115,68	-9,87	25,72	-104,72	-55,72	104,72	153,72
340	-24,43	116,11	-9,42	25,89	-101,53	-52,53	101,53	150,53
341	-24,58	116,54	-8,97	26,05	-98,26	-49,26	98,26	147,26
342	-24,73	116,97	-8,51	26,21	-94,92	-45,92	94,92	143,92
343	-24,86	117,40	-8,06	26,35	-91,51	-42,51	91,51	140,51
344	-24,99	117,83	-7,59	26,49	-88,05	-39,05	88,05	137,05
345	-25,11	118,27	-7,13	26,61	-84,52	-35,52	84,52	133,52
346	-25,23	118,71	-6,67	26,74	-80,93	-31,93	80,93	129,93
347	-25,33	119,15	-6,20	26,85	-77,28	-28,28	77,28	126,28
348	-25,43	119,59	-5,73	26,95	-73,58	-24,58	73,58	122,58

q [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	v_{x0} [m/s]	v_{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]	Valore assoluto Gittata G [m]	Valore assoluto Gittata + 2/3 L [m]
349	-25,52	120,04	-5,26	27,05	-69,83	-20,83	69,83	118,83
350	-25,61	120,49	-4,78	27,14	-66,03	-17,03	66,03	115,03
351	-25,68	120,93	-4,31	27,21	-62,18	-13,18	62,18	111,18
352	-25,75	121,38	-3,83	27,29	-58,29	-9,29	58,29	107,29
353	-25,81	121,83	-3,36	27,35	-54,37	-5,37	54,37	103,37
354	-25,86	122,28	-2,88	27,40	-50,40	-1,40	50,40	99,40
355	-25,90	122,73	-2,40	27,45	-46,40	2,60	46,40	95,40
356	-25,94	123,19	-1,92	27,49	-42,37	6,63	42,37	91,37
357	-25,96	123,64	-1,44	27,52	-38,31	10,69	38,31	87,31
358	-25,98	124,09	-0,96	27,54	-34,23	14,77	34,23	83,23
359	-26,00	124,55	-0,48	27,55	-30,12	18,88	30,12	79,12
360	-26,00	125,00	0,00	27,55	-26,00	23,00	26,00	75,00

Tabella 8.1: Calcolo gittata massima

Di seguito si riportano i grafici della distanza di gittata della pala, del relativo valore assoluto e, in via cautelativa e nell'ambito del calcolo della gittata massima, del valore assoluto + 2/3 L.

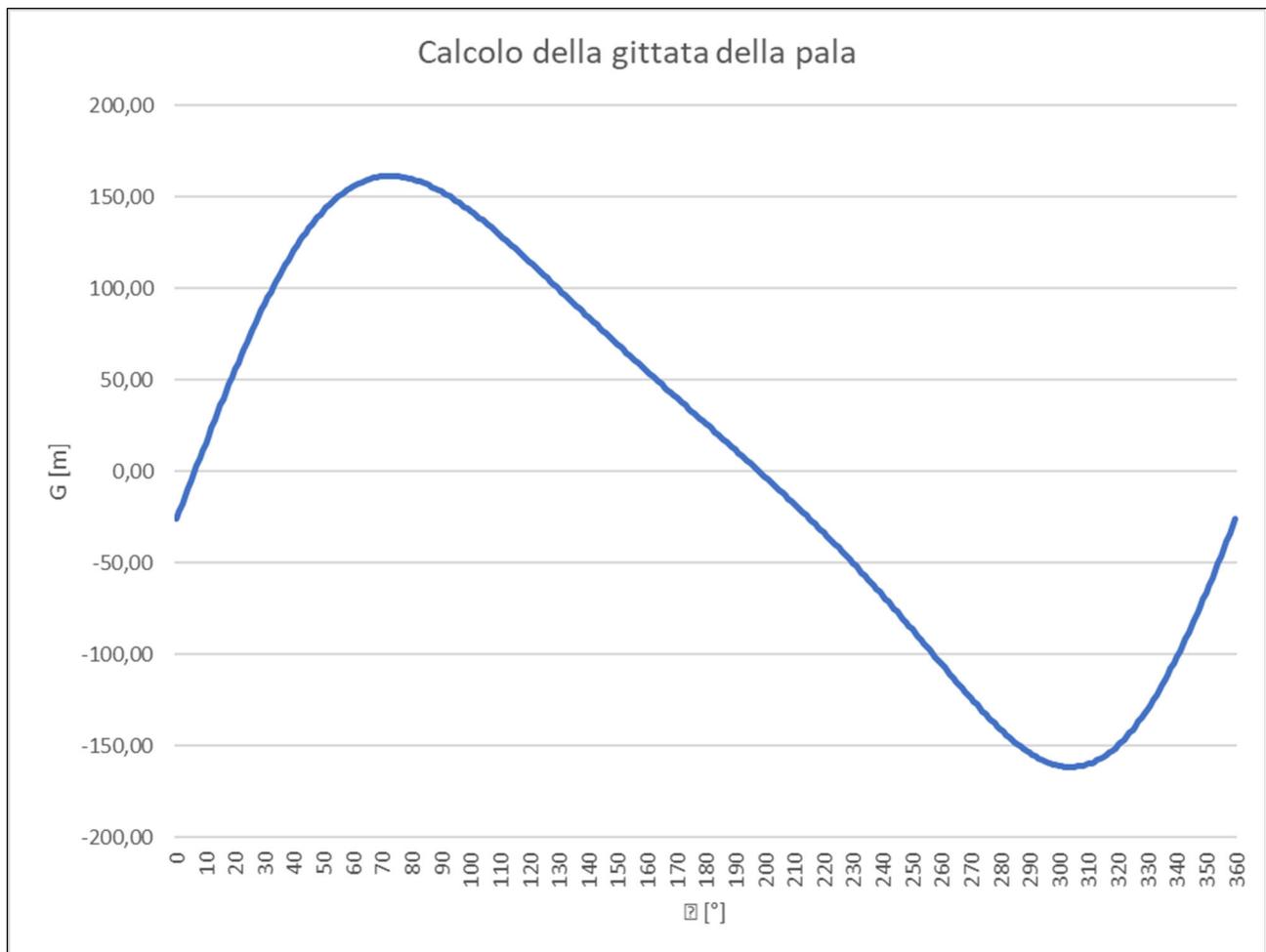


Figura 8.2: Rappresentazione grafica della gittata della pala

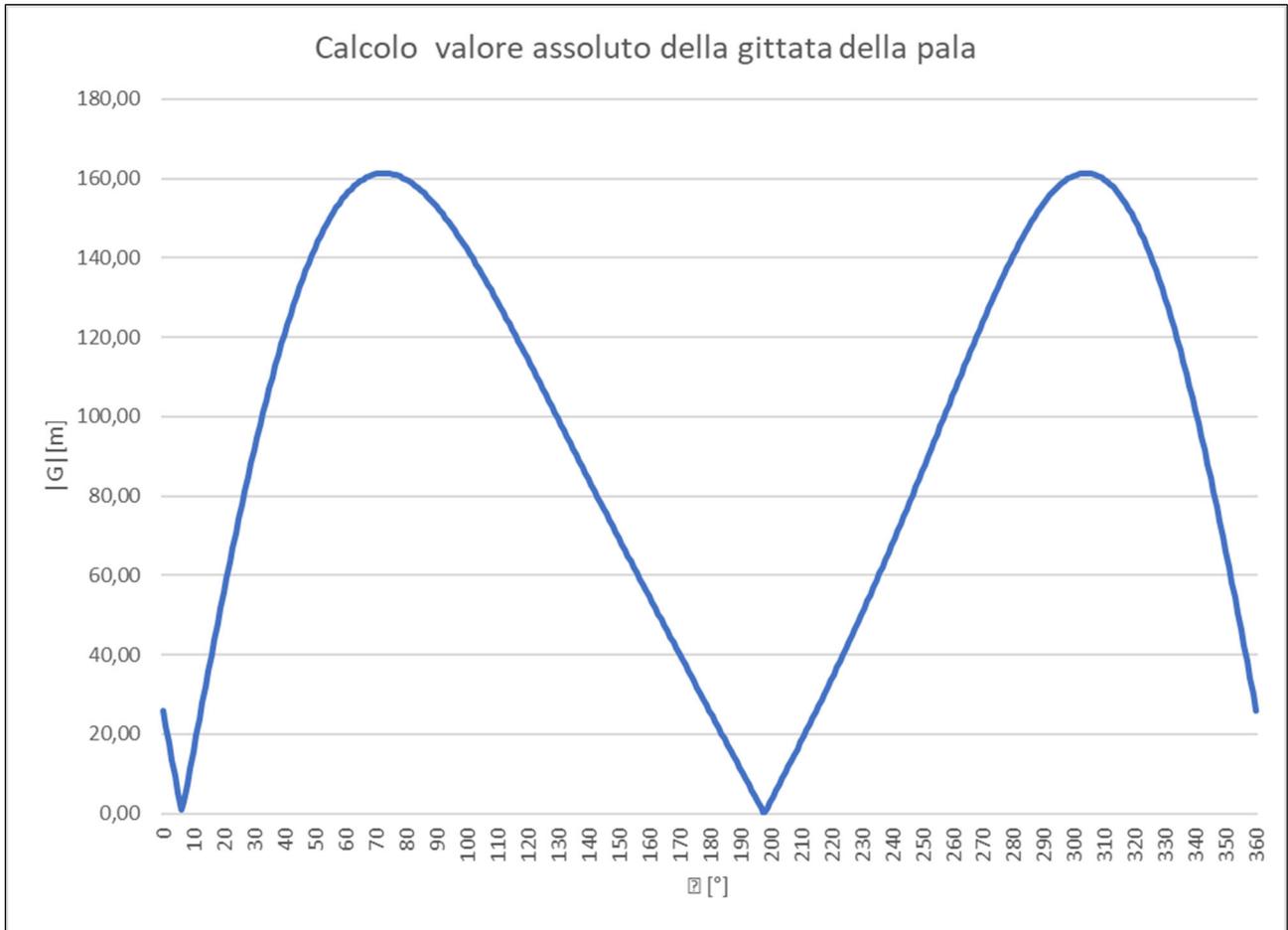


Figura 8.3: Rappresentazione grafica del valore assoluto della gittata della pala

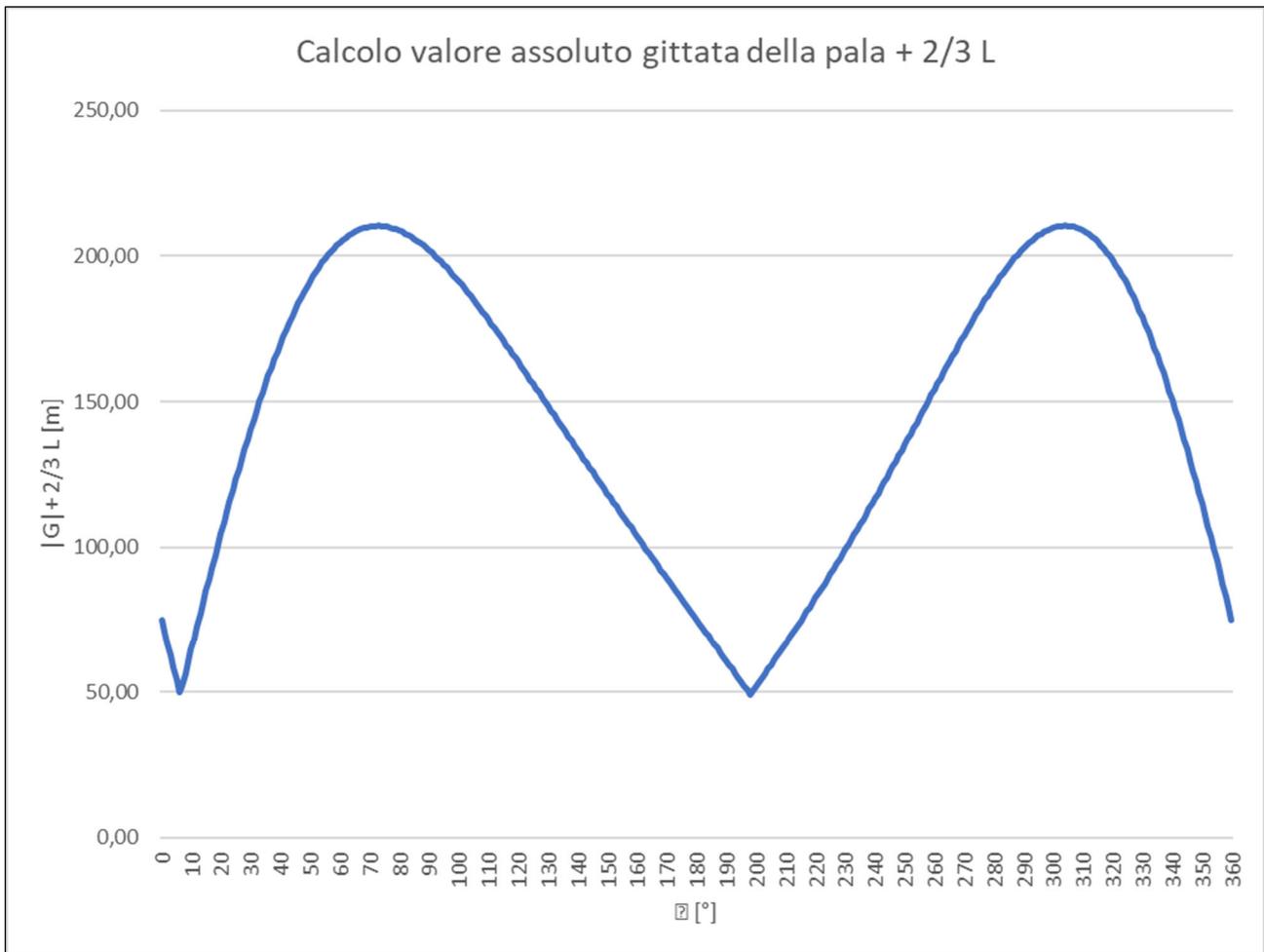


Figura 8.4: Rappresentazione grafica del valore assoluto della gittata della pala + 2/3 L

I 2 punti di massimo del valore assoluto della gittata sono $|G1|_{MAX} = 161,38 \text{ m}$ e $|G2|_{MAX} = 161,39 \text{ m}$ e si ottengono in corrispondenza degli angoli θ rispettivamente di 73° e 304° , mentre $|G1|_{MAX} + 2/3 L = 210,38 \text{ m}$ e $|G2|_{MAX} + 2/3 L = 210,39 \text{ m}$.

Nel calcolo effettuato, in via cautelativa, si è considerato il massimo valore della frequenza di rotazione del rotore della pala ($\text{rpm} = 10,12 \text{ giri/min}$); qualora si prendesse come riferimento la frequenza di rotazione media del rotore, ovvero $\text{rpm} = 8,42 \text{ giri/min}$ (**Tabella 2.1**), i due punti di massimo del valore assoluto della gittata sarebbero pari a circa $130,23 \text{ m}$, in corrispondenza degli angoli 78° e 303° , e il valore assoluto massimo del valore assoluto della gittata della pala + 2/3 L si ridurrebbe a $179,23 \text{ m}$.

9. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA DEL FRAMMENTO DELLA PALA

Le pale dell'aerogeneratore sono progettate in fibra di vetro rinforzato con fibre epossidiche o poliestere, ovvero materiali che rendono notevolmente trascurabile la probabilità che si verifichi un distacco di un frammento, in quanto, anche nel caso di rotture importanti, tali fibre mantengono l'intera pala in un unico pezzo e istantaneamente i sistemi di sicurezza della turbina riducono la velocità di rotazione, evitando l'eventuale distacco del frammento.

Ognuna delle pale degli aerogeneratori di progetto è costituita da due rinforzi interni, realizzati in materiale composito, necessari per sostenere il carico della pala, e una superficie più esterna, caratterizzata da due semigusci, realizzati con materiale composito rinforzato con fibra di vetro e accoppiati ai rinforzi interni.

I due semigusci esterni sono caratterizzati da giunzione longitudinale rispetto all'asse della pala, ma non da giunzioni trasversali, il che implica che, nell'ipotesi di per sé remota accada un danneggiamento del materiale dei componenti della pala, sia praticamente impossibile il verificarsi del distacco di un frammento terminale della stessa, mentre l'unica eventualità potrebbe riguardare, anche se con una probabilità molto trascurabile, la separazione tra i due semigusci esterni.

In tale situazione la separazione sarebbe parziale e le parti quali i rinforzi interni della pala e il semiguscio non interessato dal danneggiamento tenderebbero a restare attaccati al semiguscio danneggiato, provocando un mal funzionamento del rotore non bilanciato.

Conseguentemente, considerando che gli aerogeneratori di progetto sono dotati di un sistema di sicurezza della pala che ne interrompe il funzionamento nei casi di condizioni di non bilanciamento del rotore, oltre che in altri casi quali situazioni di eccessivo carico sulla pala, l'eventuale nonché remoto caso di separazione parziale del semiguscio danneggiato dal resto della pala provocherebbe l'interruzione automatica della turbina, scongiurando certamente il distacco di un frammento alla massima velocità di rotazione del rotore.

Una ulteriore ed eventuale causa di malfunzionamento riguarda le fulminazioni, anche se gli aerogeneratori di nuova generazione adottati sono muniti di un sistema di protezione da tale fenomeno oltre ad essere dotati di un sistema di messa a terra di protezione.

Queste considerazioni implicano che l'eventuale rottura del frammento della pala non avverrebbe in maniera netta, in quanto lo stesso resterebbe vincolato parzialmente alla pala, dovendo peraltro impiegare parte dell'energia cinetica per la rottura del legame che lo lega alla pala e, nella bassissima probabilità che avvenisse, la velocità di rotazione della pala al momento del distacco potrebbe essere considerata pari a quella minima di funzionamento.

Alla luce di quanto detto, è stato effettuato il calcolo del valore assoluto della gittata, dei relativi punti di massimo, del valore assoluto della gittata $+ 2/3 L_{\text{FRAMMENTO}}$ e dei relativi valori massimi nei casi di proiezione di frammenti di pala di lunghezza di 5 m e 10 m e nel caso di frequenza minima di rotazione del rotore di 4,82 giri/min (**Tabella 2.1**).

FRAMMENTO DI PALA DI LUNGHEZZA DI 5 m



Figura 9.1: Grafico del valore assoluto della gittata del frammento della pala di lunghezza 5m



Figura 9.2: Grafico del valore assoluto della gittata del frammento della pala di lunghezza $5 \text{ m} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}}$

I punti di massimo del valore assoluto della gittata sono $|G1|_{\text{MAX}} = 74,37 \text{ m}$, $|G2|_{\text{MAX}} = 261,62 \text{ m}$ e $|G3|_{\text{MAX}} = 184,66 \text{ m}$ e si ottengono in corrispondenza degli angoli θ rispettivamente di 7° , 91° e 254° , mentre $|G1|_{\text{MAX}} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}} = 77,70 \text{ m}$, $|G2|_{\text{MAX}} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}} = 264,95 \text{ m}$ e $|G3|_{\text{MAX}} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}} = 187,99 \text{ m}$ ($L_{\text{FRAMMENTO}} = 5 \text{ m}$).

FRAMMENTO DI PALA DI LUNGHEZZA DI 10 m

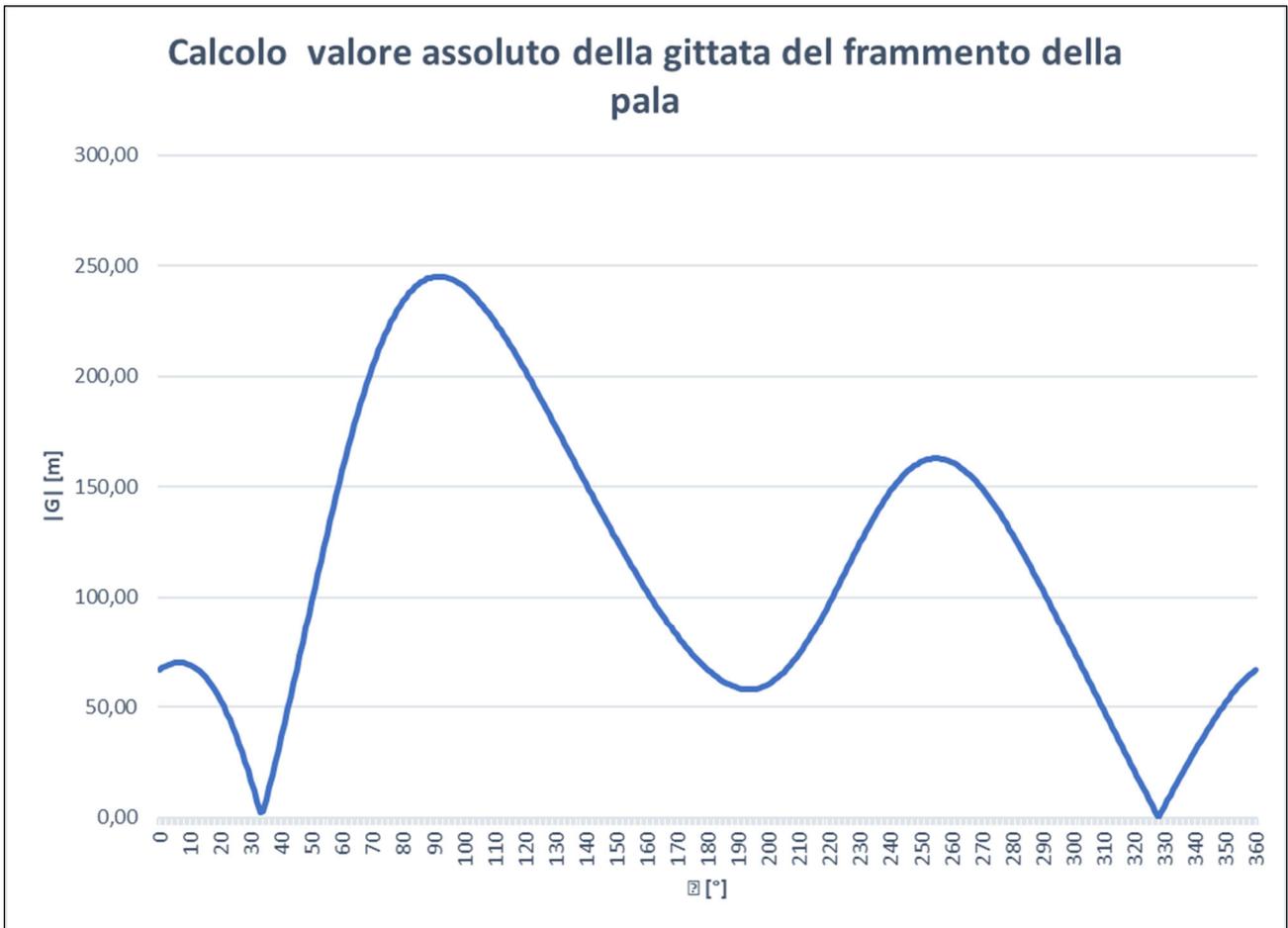


Figura 9.3: Grafico del valore assoluto della gittata del frammento della pala di lunghezza 10 m



Figura 9.4: Grafico del valore assoluto della gittata del frammento della pala di lunghezza $10\text{ m} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}}$

I punti di massimo del valore assoluto della gittata sono $|G1|_{\text{MAX}} = 70,05\text{ m}$, $|G2|_{\text{MAX}} = 245,24\text{ m}$ e $|G3|_{\text{MAX}} = 169,60\text{ m}$ e si ottengono in corrispondenza degli angoli θ rispettivamente di 6° , 92° e 255° , mentre $|G1|_{\text{MAX}} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}} = 76,71\text{ m}$, $|G2|_{\text{MAX}} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}} = 251,91\text{ m}$ e $|G3|_{\text{MAX}} + \frac{2}{3} L_{\text{FRAMMENTO}} = 162,94\text{ m}$ ($L_{\text{FRAMMENTO}} = 10\text{ m}$).

10. CONCLUSIONI

Nel caso di distacco, sia in corrispondenza dell'angolo θ di 73° che 304° , la pala raggiunge la sua gittata massima pari a circa $210,4\text{ m}$, valutata come il massimo del suo valore assoluto $+ \frac{2}{3}$ della lunghezza della stessa.

Tutto ciò è stato ottenuto in base alle ipotesi cautelative elencate nel paragrafo precedente, ovvero non considerando il moto della pala come rotazionale complesso nel caso di eventuale distacco e considerando quale velocità iniziale al momento del distacco quella dipendente dalla massima frequenza di rotazione della pala ($10,12\text{ giri/min}$); tuttavia, come discusso in precedenza, il valore della gittata massima nel caso teorico esaminato è superiore rispetto a quello che si otterrebbe nel caso, più

realistico, in cui si prendessero in considerazione le forze di attrito viscoso e nel caso in cui l'eventuale distacco avvenisse alla frequenza di rotazione inferiore a quella massima.

Nelle figure seguenti sono riportate le posizioni degli aerogeneratori di progetto e le aree interessate dalla rottura della pala relativamente ad ognuno di essi e nel caso delle ipotesi utilizzate nel calcolo effettuato (buffer di 210,4 m).

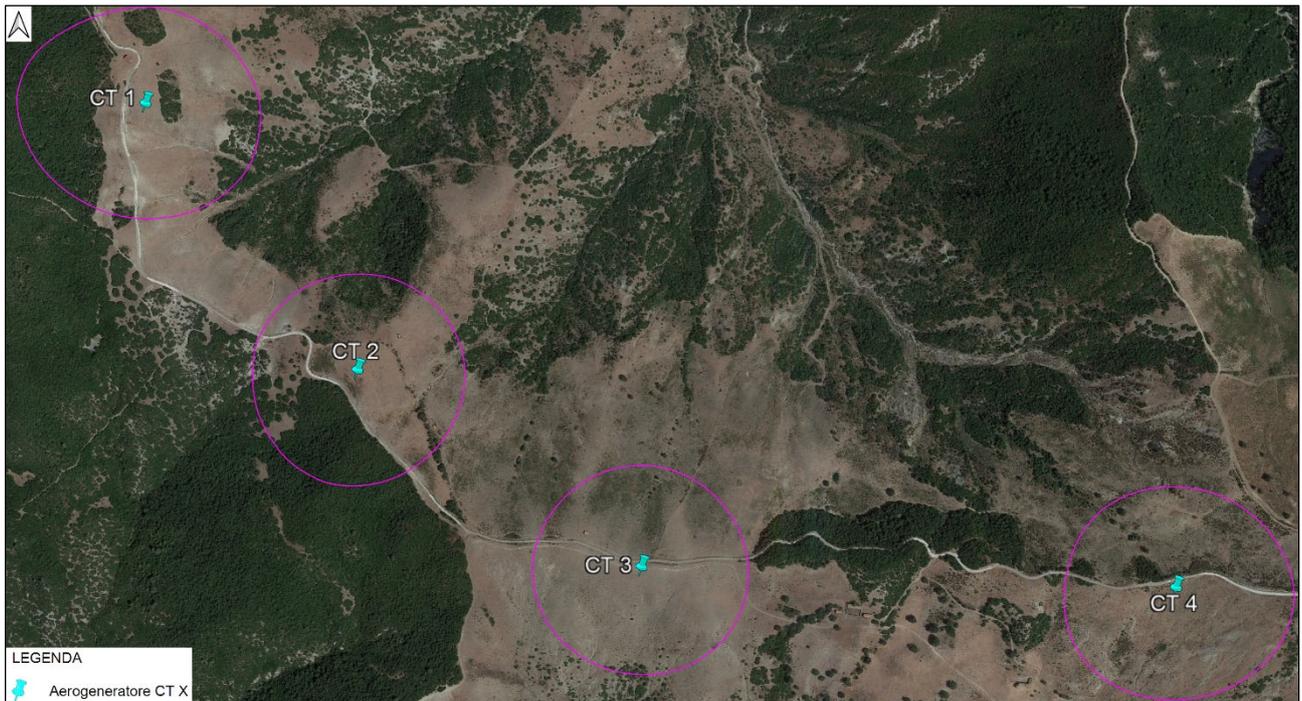


Figura 10.1: Aree interessate dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori CT 1, CT 2, CT 3 e CT 4 su immagine satellitare



Figura 10.2: Aree interessate dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori CT 6 e CT 7 su immagine satellitare

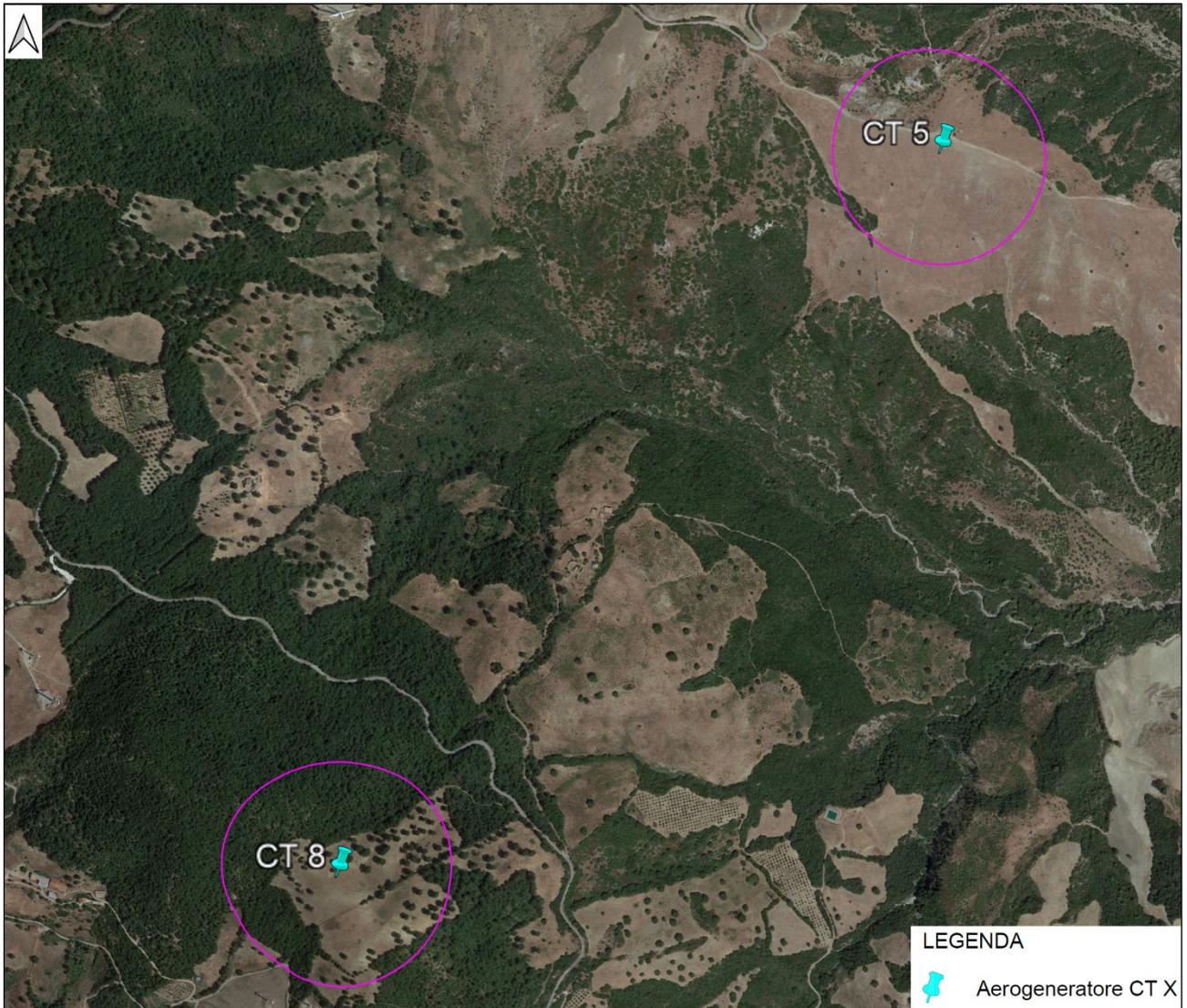


Figura 10.3: Aree interessate dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori CT 5 e CT 9 su immagine satellitare



Figura 10.4: Aree interessate dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori CT 9 e CT 10 su immagine satellitare

Dalle figure precedenti si evince che nelle aree interessate dalla rottura della pala, per ognuno degli aerogeneratori di progetto, nonostante le ipotesi cautelative utilizzate nel calcolo effettuato, non sono presenti ricettori sensibili, quali abitazioni o strade interessate dal passaggio frequente di mezzi (strade statali, strade provinciali, strade comunali verso centri abitati).

Nella remota situazione di distacco di frammenti (proiezione di frammenti di lunghezza 5 m e 10 m) della pala, i valori massimi assoluti del valore assoluto della gittata + $2/3$ della lunghezza del frammento in questione, nel caso di rpm minimo, sono rispettivamente pari a circa 264,9 m ($L_{FRAMMENTO}$ pari a 5 m) e 251,9 m ($L_{FRAMMENTO}$ pari a 10 m).