

# AUTORIZZAZIONE UNICA EX D. LGS. N. 387/2003



## PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO MONTENERO

Titolo elaborato:

### ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

LT	GD	GD	EMISSIONE	25/07/22	0	0
REDATTO	CONTR.	APPROV.	DESCRIZIONE REVISIONE DOCUMENTO	DATA	REV	

#### PROPONENTE



**NATURAL PRIME S.R.L.**

VIA G. GARIBALDI N. 15  
74023 GROTTAGLIE (TA)

#### CONSULENZA



**GE.CO.D'OR S.R.L.**

VIA G. GARIBALDI N. 15  
74023 GROTTAGLIE (TA)

#### PROGETTISTA

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

Codice  
MNSA121

Formato  
A4

Scala  
/

Foglio  
1 di 20

## Sommario

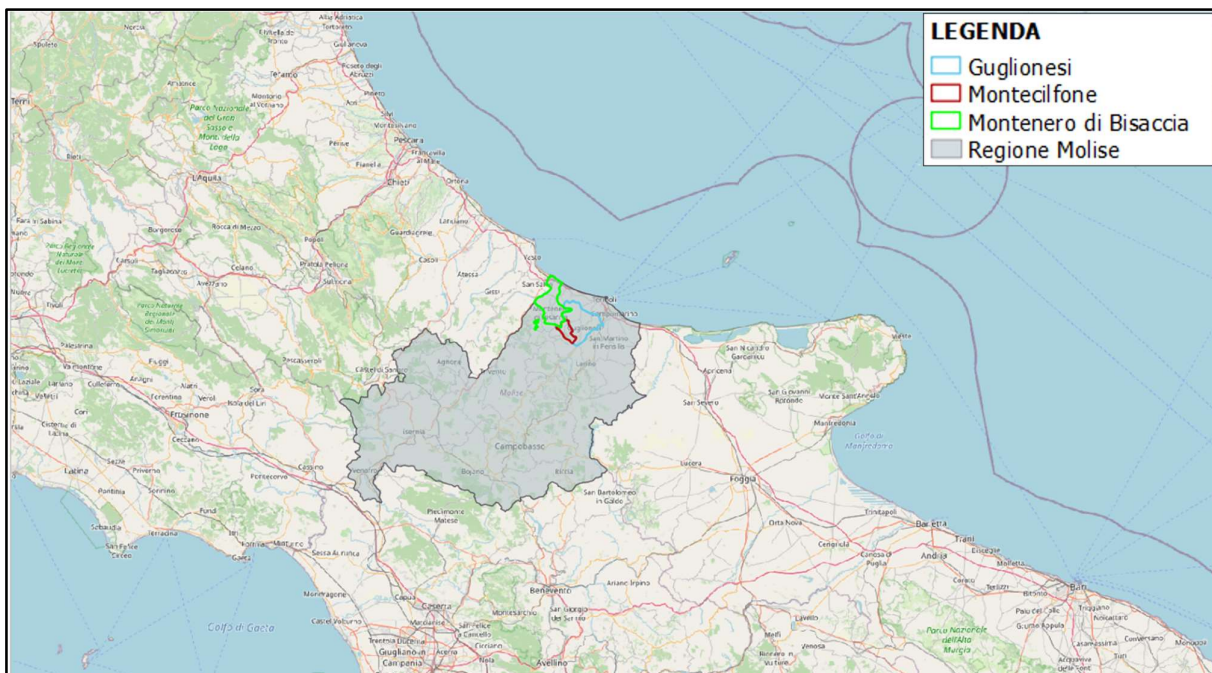
1.	PREMESSA	3
2.	CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE	4
3.	STUDI CONDOTTI SUGLI INCIDENTI	4
4.	CAUSE DI ROTTURA DELLA PALA O PARTE DI ESSA	7
5.	STUDIO DELLA GITTATA	8
6.	ANALISI TEORICA DEL MOTO DI ROTAZIONE COMPLESSO	9
7.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA	10
8.	CONCLUSIONI	18

## 1. PREMESSA

La **Natural Prime s.r.l.** è una società costituita per realizzare un impianto eolico in Molise, denominato “**Parco Eolico Montenero**”, nel territorio dei Comuni di Montenero di Bisaccia, Guglionesi e Montecilfone (Provincia di Campobasso) con punto di connessione a 36 kV in corrispondenza della stazione elettrica RTN Terna 380/150/36 kV Montecilfone di futura realizzazione.

A tale scopo, la Ge.co.D’Or. s.r.l., società italiana impegnata nello sviluppo di impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili con particolare focus nel settore dell’eolico e proprietaria della suddetta Natural Prime s.r.l., si è occupata della progettazione definitiva per la richiesta di Autorizzazione Unica (AU) alla costruzione e l’esercizio del suddetto impianto eolico e della relativa Valutazione d’Impatto Ambientale (VIA).

L’impianto eolico presenta una potenza nominale totale in immissione pari a 36 MWp ed è costituito da n. 6 aerogeneratori di potenza nominale pari a 6.0 MWp con altezza torre pari a 135 m e rotore pari a 170 m.



**Figura 1.1:** Localizzazione Impianto Eolico Montenero

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.

Per il presente progetto una delle possibili macchine che verrà installata è il modello Siemens Gamesa SG 170 di potenza nominale pari a 6.0 MW, altezza torre all'hub pari a 135 m e diametro del rotore 170 m (**Figura 2.1**).

Oltre ai componenti su elencati, vi è un sistema di controllo che esegue, il controllo della potenza ruotando le pale intorno al loro asse principale, ed il controllo dell'orientamento della navicella, detto 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 di diametro pari a 170 metri, posto sopravvento al sostegno, con mozzo rigido in acciaio. Altre caratteristiche salienti sono riassunte nella **Tabella 2.1**.

Le caratteristiche dell'aerogeneratore su 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.

In accordo alle disposizioni dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), ognuna delle macchine è dotata di un sistema di segnalazione notturna per la segnalazione aerea, che prevede l'utilizzo di una luce rossa sull'estradosso della navicella.

Una segnalazione diurna, consistente nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande di colore rosso ciascuna di 6 m per un totale di 18 m, è prevista per gli aerogeneratori di inizio e fine tratto.

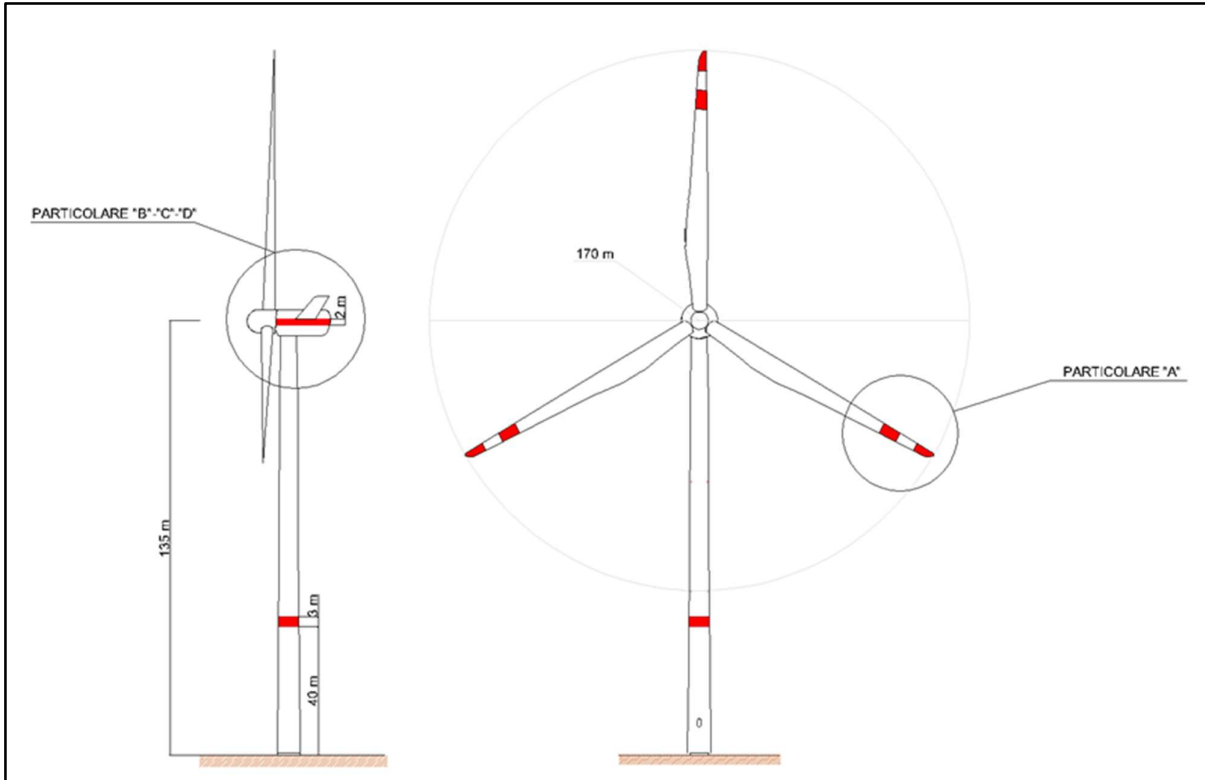


Figura 2.1: Profilo aerogeneratore SG170 – 6.0 MW

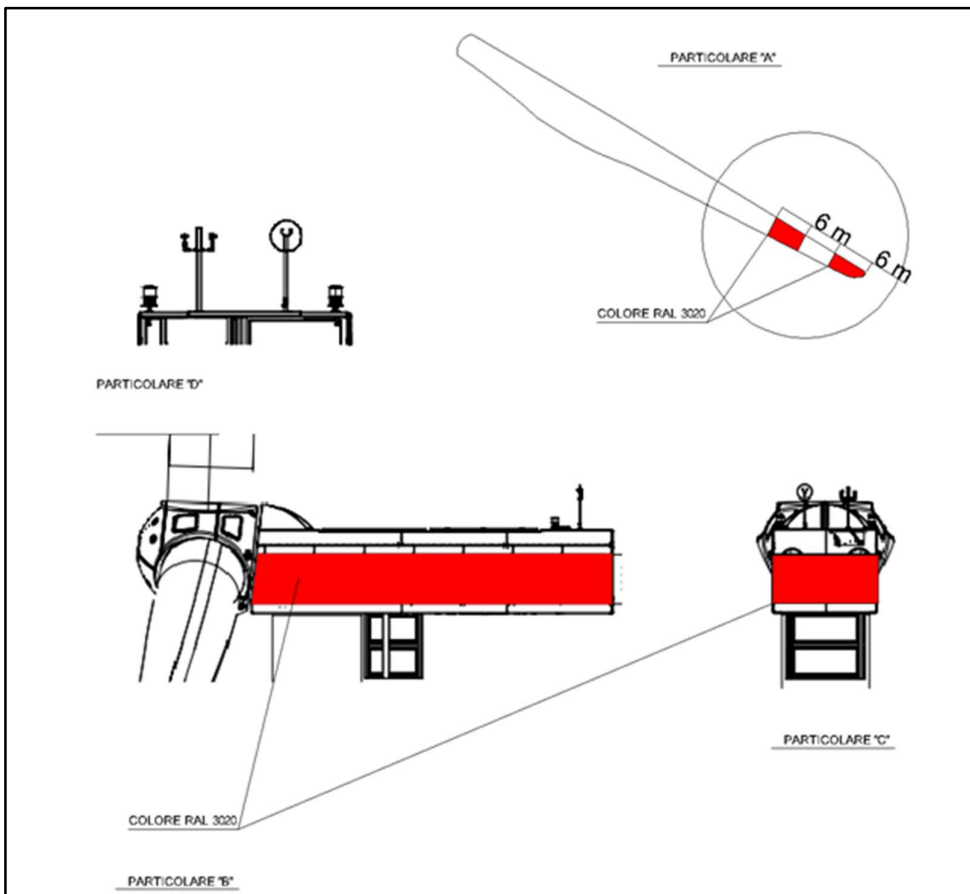


Figura 2.2: Particolari aerogeneratore SG170 – 6.0 MW

<b>Rotor</b>		<b>Grid Terminals (LV)</b>	
Type.....	3-bladed, horizontal axis	Baseline nominal power.....	6.0MW/6.2 MW
Position.....	Upwind	Voltage.....	690 V
Diameter.....	170 m	Frequency.....	50 Hz or 60 Hz
Swept area.....	22,698 m <sup>2</sup>	<b>Yaw System</b>	
Power regulation.....	Pitch & torque regulation with variable speed	Type.....	Active
Rotor tilt.....	6 degrees	Yaw bearing.....	Externally geared
<b>Blade</b>		Yaw drive.....	Electric gear motors
Type.....	Self-supporting	Yaw brake.....	Active friction brake
Single piece blade length	83,3 m	<b>Controller</b>	
Segmented blade length:		Type.....	Siemens Integrated Control System (SICS)
Inboard module.....	68,33 m	SCADA system.....	Consolidated SCADA (CSSS)
Outboard module.....	15,04 m	<b>Tower</b>	
Max chord.....	4.5 m	Type.....	Tubular steel / Hybrid
Aerodynamic profile.....	Siemens Gamesa proprietary airfoils	Hub height.....	100m to 165 m and site- specific
Material.....	G (Glassfiber) – CRP (Carbon Reinforced Plastic)	Corrosion protection.....	
Surface gloss.....	Semi-gloss, < 30 / ISO2813	Surface gloss.....	Painted
Surface color.....	Light grey, RAL 7035 or White, RAL 9018	Color.....	Semi-gloss, <30 / ISO-2813 Light grey, RAL 7035 or White, RAL 9018
<b>Aerodynamic Brake</b>		<b>Operational Data</b>	
Type.....	Full span pitching	Cut-in wind speed.....	3 m/s
Activation.....	Active, hydraulic	Rated wind speed.....	11.0 m/s (steady wind without turbulence, as defined by IEC61400-1)
<b>Load-Supporting Parts</b>		Cut-out wind speed.....	25 m/s
Hub.....	Nodular cast iron	Restart wind speed.....	22 m/s
Main shaft.....	Nodular cast iron	<b>Weight</b>	
Nacelle bed frame.....	Nodular cast iron	Modular approach.....	Different modules depending on restriction
<b>Mechanical Brake</b>			
Type.....	Hydraulic disc brake		
Position.....	Gearbox rear end		
<b>Nacelle Cover</b>			
Type.....	Totally enclosed		
Surface gloss.....	Semi-gloss, <30 / ISO2813		
Color.....	Light Grey, RAL 7035 or White, RAL 9018		
<b>Generator</b>			
Type.....	Asynchronous, DFIG		

Tabella 2.1: Specifiche tecniche aerogeneratore

### 3. 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 m<sup>2</sup> 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  $6 \times 10^{-5}$  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.

#### **4. CAUSE DI ROTTURA DELLA PALA O 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 metereologiche 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 %.

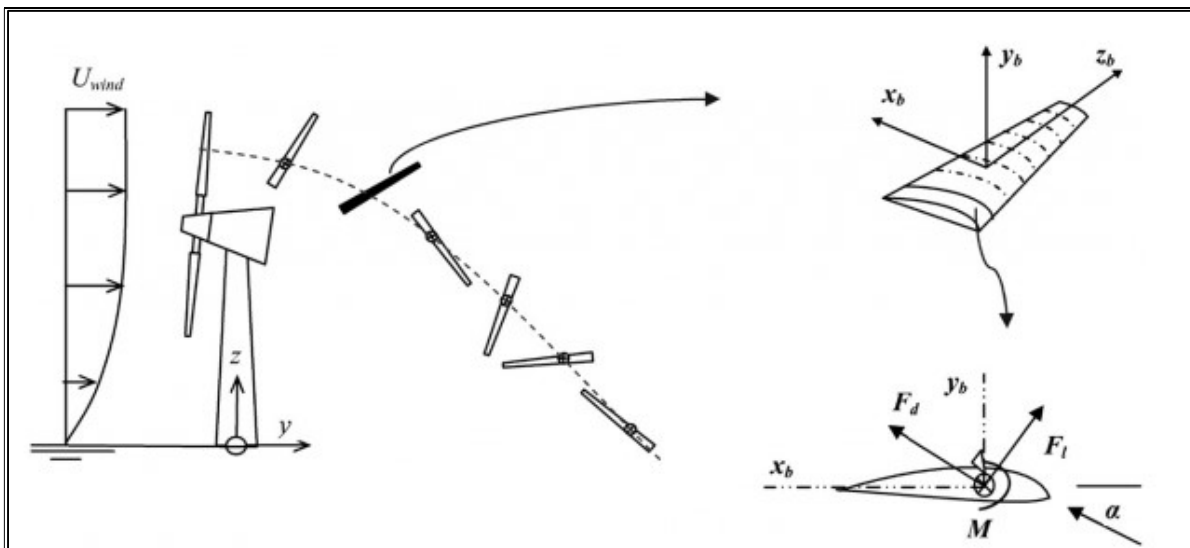
Questo implica che solo nel 2 % dei casi si possono avere danni della turbina nel caso la fulminazione.

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

## 5. 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 5.1:** 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 di 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.

## **6. 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.

## **7. CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA**

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

$$x = x_0 + v_{x0} t \tag{1}$$

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

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  $\theta$  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.

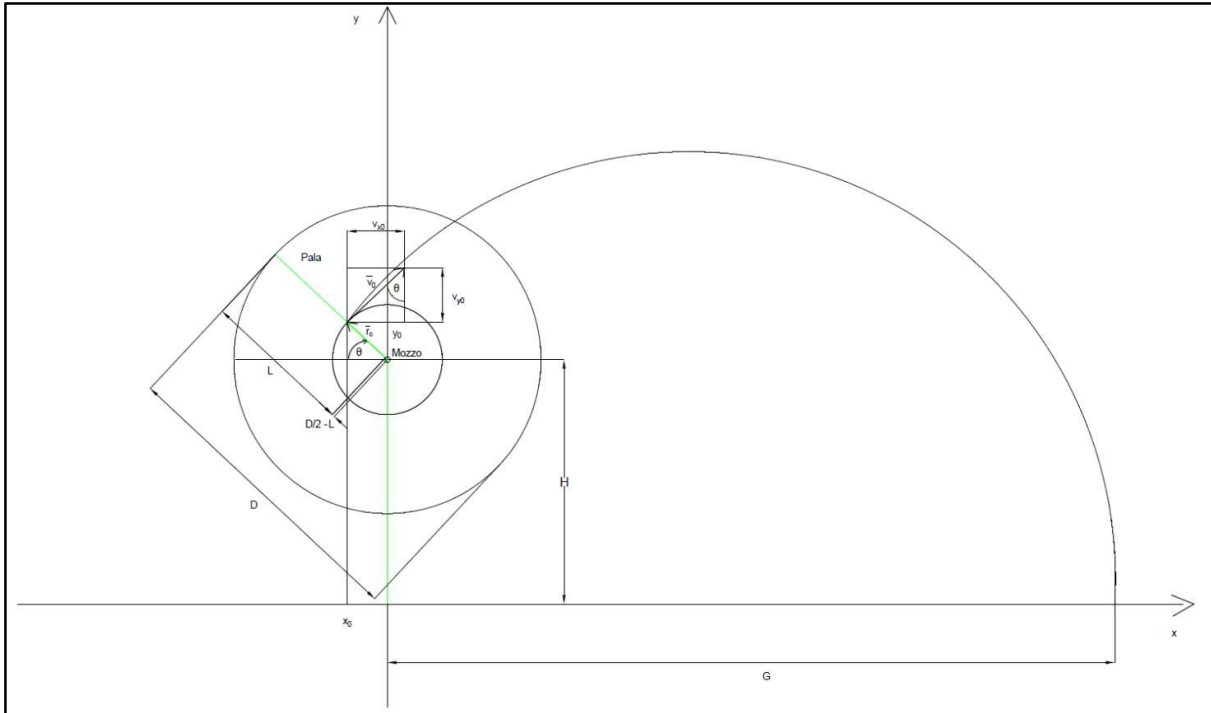
Detta L la lunghezza della pala e D il diametro rotorico, il centro di massa della pala si trova ad una distanza dal centro del mozzo pari a:

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

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

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

$$y_0 = H + r_c \sin\theta$$



**Figura 7.1:** 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  $\theta$ ,  $H$ ,  $D$ ,  $L$  e  $v_0$ .

Considerando i dati tecnici dell'aerogeneratore di progetto, la frequenza massima di rotazione del rotore è pari a 10,6 rpm.

Detta  $\omega$  la velocità angolare massima di esercizio (giri al minuto), la velocità di distacco della pala massima (in 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;
- $v_0 = 32,56 \text{ m/s}$ ,  $r_c = 29,33 \text{ m}$ ,  $\text{rpm} = 10,6 \text{ giri/min}$ ;
- $H = 135 \text{ m}$ ,  $L = 83,5 \text{ m}$ ,  $D = 170 \text{ m}$ .

La tabella seguente fornisce i principali risultati del calcolo della gitta massima.

$\theta$ [°]	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$v_{x0}$ [m/s]	$v_{y0}$ [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
0	-29,3333	135	0	32,56086253	-29,33333333	26,33333333
1	-29,3289	135,5119	0,568265407	32,55590335	-23,90632318	31,76034349
2	-29,3155	136,0237	1,136357714	32,54102733	-18,46514175	37,20152491
3	-29,2931	136,5352	1,704103876	32,51623899	-13,01411441	42,65255225
4	-29,2619	137,0462	2,271330952	32,4815459	-7,557564705	48,10910196
5	-29,2217	137,5566	2,837866158	32,43695861	-2,099808862	53,5668578
6	-29,1726	138,0662	3,403536922	32,38249071	3,354849676	59,02151634
7	-29,1147	138,5748	3,968170937	32,31815879	8,802125705	64,46879237
8	-29,0479	139,0824	4,531596208	32,24398245	14,23775766	69,90442433
9	-28,9722	139,5887	5,09364111	32,15998428	19,65751296	75,32417963
10	-28,8877	140,0937	5,654134441	32,06618986	25,05719331	80,72385998
11	-28,7944	140,5971	6,212905467	31,96262777	30,43263991	86,09930658
12	-28,6923	141,0987	6,769783982	31,84932956	35,77973863	91,44640529
13	-28,5815	141,5986	7,324600355	31,72632973	41,09442505	96,76109172
14	-28,462	142,0964	7,877185584	31,59366575	46,37268949	102,0393562
15	-28,3338	142,592	8,427371346	31,45137804	51,61058186	107,2772485
16	-28,197	143,0854	8,97499005	31,29950993	56,80421646	112,4708831
17	-28,0516	143,5762	9,519874884	31,13810769	61,94977669	117,6164434
18	-27,8977	144,0645	10,06185987	30,96722048	67,04351957	122,7101862
19	-27,7352	144,55	10,60077992	30,78690036	72,08178019	127,7484469
20	-27,5643	145,0326	11,13647087	30,59720224	77,06097609	132,7276428
21	-27,385	145,5121	11,66876954	30,39818392	81,97761133	137,644278
22	-27,1974	145,9885	12,19751379	30,18990602	86,82828063	142,4949473
23	-27,0015	146,4614	12,72254256	29,97243199	91,6096732	147,2763399
24	-26,7973	146,9309	13,24369592	29,74582806	96,3185765	151,9852432
25	-26,585	147,3968	13,76081512	29,51016326	100,9518798	156,6185465
26	-26,3646	147,8589	14,27374265	29,26550938	105,5065777	161,1732444
27	-26,1362	148,3171	14,78232225	29,01194094	109,9797731	165,6464398
28	-25,8998	148,7712	15,28639902	28,74953519	114,3686807	170,0353473
29	-25,6555	149,2211	15,7858194	28,47837205	118,6706293	174,337296
30	-25,4034	149,6667	16,28043126	28,19853412	122,8830652	178,5497319
31	-25,1436	150,1078	16,77008395	27,91010664	127,0035542	182,6702209
32	-24,8761	150,5443	17,25462831	27,61317747	131,029784	186,6964506
33	-24,601	150,9761	17,73391674	27,30783707	134,9595664	190,6262331
34	-24,3184	151,403	18,20780325	26,99417843	138,7908393	194,457506

$\theta$ [°]	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$v_{x0}$ [m/s]	$v_{y0}$ [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
35	-24,0285	151,8249	18,67614349	26,6722971	142,5216683	198,1883349
36	-23,7312	152,2417	19,13879479	26,34229113	146,1502481	201,8169147
37	-23,4266	152,6532	19,59561623	26,00426105	149,6749039	205,3415706
38	-23,115	153,0594	20,04646866	25,65830982	153,0940927	208,7607594
39	-22,7963	153,4601	20,49121474	25,30454281	156,4064038	212,0730704
40	-22,4706	153,8551	20,92971899	24,9430678	159,6105593	215,277226
41	-22,1381	154,2444	21,36184785	24,57399489	162,7054152	218,3720819
42	-21,7989	154,6278	21,78746969	24,1974365	165,6899609	221,3566276
43	-21,453	155,0053	22,20645484	23,81350734	168,5633196	224,2299863
44	-21,1006	155,3766	22,6186757	23,42232435	171,3247478	226,9914145
45	-20,7418	155,7418	23,02400669	23,02400669	173,9736349	229,6403015
46	-20,3766	156,1006	23,42232435	22,6186757	176,5095025	232,1761692
47	-20,0053	156,453	23,81350734	22,20645484	178,9320036	234,5986703
48	-19,6278	156,7989	24,1974365	21,78746969	181,2409213	236,9075879
49	-19,2444	157,1381	24,57399489	21,36184785	183,4361673	239,102834
50	-18,8551	157,4706	24,9430678	20,92971899	185,5177809	241,1844476
51	-18,4601	157,7963	25,30454281	20,49121474	187,4859265	243,1525932
52	-18,0594	158,115	25,65830982	20,04646866	189,340892	245,0075587
53	-17,6532	158,4266	26,00426105	19,59561623	191,0830865	246,7497532
54	-17,2417	158,7312	26,34229113	19,13879479	192,7130379	248,3797046
55	-16,8249	159,0285	26,6722971	18,67614349	194,2313903	249,898057
56	-16,403	159,3184	26,99417843	18,20780325	195,6389012	251,3055679
57	-15,9761	159,601	27,30783707	17,73391674	196,9364385	252,6031052
58	-15,5443	159,8761	27,61317747	17,25462831	198,1249773	253,7916439
59	-15,1078	160,1436	27,91010664	16,77008395	199,2055966	254,8722632
60	-14,6667	160,4034	28,19853412	16,28043126	200,1794758	255,8461425
61	-14,2211	160,6555	28,47837205	15,7858194	201,0478913	256,7145579
62	-13,7712	160,8998	28,74953519	15,28639902	201,812212	257,4788787
63	-13,3171	161,1362	29,01194094	14,78232225	202,4738962	258,1405629
64	-12,8589	161,3646	29,26550938	14,27374265	203,034487	258,7011537
65	-12,3968	161,585	29,51016326	13,76081512	203,4956083	259,1622749
66	-11,9309	161,7973	29,74582806	13,24369592	203,8589604	259,5256271
67	-11,4614	162,0015	29,97243199	12,72254256	204,1263159	259,7929825
68	-10,9885	162,1974	30,18990602	12,19751379	204,2995148	259,9661814
69	-10,5121	162,385	30,39818392	11,66876954	204,3804603	260,047127
70	-10,0326	162,5643	30,59720224	11,13647087	204,3711142	260,0377809

$\theta$ [°]	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$v_{x0}$ [m/s]	$v_{y0}$ [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
71	-9,55	162,7352	30,78690036	10,60077992	204,2734921	259,9401588
72	-9,0645	162,8977	30,96722048	10,06185987	204,0896588	259,7563254
73	-8,57624	163,0516	31,13810769	9,519874884	203,8217234	259,4883901
74	-8,08536	163,197	31,29950993	8,97499005	203,4718352	259,1385019
75	-7,59203	163,3338	31,45137804	8,427371346	203,0421783	258,7088449
76	-7,09638	163,462	31,59366575	7,877185584	202,5349672	258,2016338
77	-6,59856	163,5815	31,72632973	7,324600355	201,9524423	257,619109
78	-6,09874	163,6923	31,84932956	6,769783982	201,2968652	256,9635319
79	-5,59706	163,7944	31,96262777	6,212905467	200,5705141	256,2371808
80	-5,09368	163,8877	32,06618986	5,654134441	199,7756793	255,4423459
81	-4,58874	163,9722	32,15998428	5,09364111	198,9146589	254,5813256
82	-4,08241	164,0479	32,24398245	4,531596208	197,9897545	253,6564212
83	-3,57483	164,1147	32,31815879	3,968170937	197,003267	252,6699337
84	-3,06617	164,1726	32,38249071	3,403536922	195,9574925	251,6241592
85	-2,55657	164,2217	32,43695861	2,837866158	194,8547184	250,521385
86	-2,04619	164,2619	32,4815459	2,271330952	193,6972193	249,363886
87	-1,53519	164,2931	32,51623899	1,704103876	192,4872539	248,1539206
88	-1,02372	164,3155	32,54102733	1,136357714	191,2270611	246,8937278
89	-0,51194	164,3289	32,55590335	0,568265407	189,9188565	245,5855232
90	-1,8E-15	164,3333	32,56086253	1,99459E-15	188,5648296	244,2314962
91	0,511937	164,3289	32,55590335	-0,568265407	187,1671405	242,8338071
92	1,023719	164,3155	32,54102733	-1,136357714	185,7279171	241,3945838
93	1,535188	164,2931	32,51623899	-1,704103876	184,2492527	239,9159194
94	2,04619	164,2619	32,4815459	-2,271330952	182,7332031	238,3998697
95	2,556568	164,2217	32,43695861	-2,837866158	181,1817844	236,8484511
96	3,066168	164,1726	32,38249071	-3,403536922	179,5969713	235,263638
97	3,574834	164,1147	32,31815879	-3,968170937	177,9806947	233,6473614
98	4,082411	164,0479	32,24398245	-4,531596208	176,33484	232,0015067
99	4,588744	163,9722	32,15998428	-5,09364111	174,6612459	230,3279125
100	5,09368	163,8877	32,06618986	-5,654134441	172,9617026	228,6283693
101	5,597064	163,7944	31,96262777	-6,212905467	171,237951	226,9046177
102	6,098743	163,6923	31,84932956	-6,769783982	169,4916815	225,1583481
103	6,598564	163,5815	31,72632973	-7,324600355	167,7245329	223,3911995
104	7,096376	163,462	31,59366575	-7,877185584	165,9380922	221,6047588
105	7,592025	163,3338	31,45137804	-8,427371346	164,1338938	219,8005604
106	8,085362	163,197	31,29950993	-8,97499005	162,3134192	217,9800859

$\theta$ [°]	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$v_{x0}$ [m/s]	$v_{y0}$ [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
107	8,576237	163,0516	31,13810769	-9,519874884	160,4780969	216,1447636
108	9,064499	162,8977	30,96722048	-10,06185987	158,6293021	214,2959688
109	9,549999	162,7352	30,78690036	-10,60077992	156,7683568	212,4350235
110	10,03259	162,5643	30,59720224	-11,13647087	154,8965304	210,5631971
111	10,51213	162,385	30,39818392	-11,66876954	153,0150393	208,681706
112	10,98846	162,1974	30,18990602	-12,19751379	151,1250482	206,7917148
113	11,46145	162,0015	29,97243199	-12,72254256	149,2276696	204,8943363
114	11,93094	161,7973	29,74582806	-13,24369592	147,3239656	202,9906322
115	12,3968	161,585	29,51016326	-13,76081512	145,4149475	201,0816142
116	12,85889	161,3646	29,26550938	-14,27374265	143,5015774	199,1682441
117	13,31705	161,1362	29,01194094	-14,78232225	141,5847688	197,2514354
118	13,77117	160,8998	28,74953519	-15,28639902	139,6653873	195,3320539
119	14,22108	160,6555	28,47837205	-15,7858194	137,744252	193,4109187
120	14,66667	160,4034	28,19853412	-16,28043126	135,8221364	191,4888031
121	15,10778	160,1436	27,91010664	-16,77008395	133,8997695	189,5664361
122	15,5443	159,8761	27,61317747	-17,25462831	131,9778366	187,6445033
123	15,97608	159,601	27,30783707	-17,73391674	130,0569811	185,7236478
124	16,40299	159,3184	26,99417843	-18,20780325	128,1378053	183,804472
125	16,82491	159,0285	26,6722971	-18,67614349	126,2208716	181,8875383
126	17,2417	158,7312	26,34229113	-19,13879479	124,3067038	179,9733704
127	17,65324	158,4266	26,00426105	-19,59561623	122,3957883	178,0624549
128	18,0594	158,115	25,65830982	-20,04646866	120,4885754	176,155242
129	18,46006	157,7963	25,30454281	-20,49121474	118,5854805	174,2521472
130	18,8551	157,4706	24,9430678	-20,92971899	116,6868854	172,353552
131	19,2444	157,1381	24,57399489	-21,36184785	114,7931392	170,4598059
132	19,62783	156,7989	24,1974365	-21,78746969	112,9045602	168,5712269
133	20,00529	156,453	23,81350734	-22,20645484	111,0214362	166,6881029
134	20,37665	156,1006	23,42232435	-22,6186757	109,1440265	164,8106932
135	20,7418	155,7418	23,02400669	-23,02400669	107,2725625	162,9392291
136	21,10063	155,3766	22,6186757	-23,42232435	105,407249	161,0739157
137	21,45304	155,0053	22,20645484	-23,81350734	103,5482656	159,2149323
138	21,79891	154,6278	21,78746969	-24,1974365	101,6957674	157,3624341
139	22,13815	154,2444	21,36184785	-24,57399489	99,84988611	155,5165528
140	22,47064	153,8551	20,92971899	-24,9430678	98,01073129	153,677398
141	22,79628	153,4601	20,49121474	-25,30454281	96,1783912	151,8450579
142	23,11498	153,0594	20,04646866	-25,65830982	94,35293377	150,0196004



$\theta$ [°]	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$v_{x0}$ [m/s]	$v_{y0}$ [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
143	23,42664	152,6532	19,59561623	-26,00426105	92,5344076	148,2010743
144	23,73117	152,2417	19,13879479	-26,34229113	90,72284279	146,3895095
145	24,02846	151,8249	18,67614349	-26,6722971	88,91825189	144,5849186
146	24,31844	151,403	18,20780325	-26,99417843	87,12063066	142,7872973
147	24,601	150,9761	17,73391674	-27,30783707	85,32995895	140,9966256
148	24,87608	150,5443	17,25462831	-27,61317747	83,54620143	139,2128681
149	25,14357	150,1078	16,77008395	-27,91010664	81,76930833	137,435975
150	25,40341	149,6667	16,28043126	-28,19853412	79,99921619	135,6658829
151	25,65551	149,2211	15,7858194	-28,47837205	78,2358485	133,9025152
152	25,8998	148,7712	15,28639902	-28,74953519	76,47911636	132,145783
153	26,13619	148,3171	14,78232225	-29,01194094	74,72891911	130,3955858
154	26,36463	147,8589	14,27374265	-29,26550938	72,98514488	128,6518115
155	26,58503	147,3968	13,76081512	-29,51016326	71,24767119	126,9143379
156	26,79733	146,9309	13,24369592	-29,74582806	69,51636546	125,1830321
157	27,00148	146,4614	12,72254256	-29,97243199	67,79108551	123,4577522
158	27,19739	145,9885	12,19751379	-30,18990602	66,07168002	121,7383467
159	27,38503	145,5121	11,66876954	-30,39818392	64,35798902	120,0246557
160	27,56432	145,0326	11,13647087	-30,59720224	62,64984425	118,3165109
161	27,73521	144,55	10,60077992	-30,78690036	60,94706961	116,6137363
162	27,89766	144,0645	10,06185987	-30,96722048	59,24948149	114,9161482
163	28,05161	143,5762	9,519874884	-31,13810769	57,55688918	113,2235558
164	28,19701	143,0854	8,97499005	-31,29950993	55,8690951	111,5357618
165	28,33382	142,592	8,427371346	-31,45137804	54,18589521	109,8525619
166	28,46201	142,0964	7,877185584	-31,59366575	52,50707922	108,1737459
167	28,58152	141,5986	7,324600355	-31,72632973	50,83243089	106,4990976
168	28,69233	141,0987	6,769783982	-31,84932956	49,16172826	104,8283949
169	28,7944	140,5971	6,212905467	-31,96262777	47,49474389	103,1614106
170	28,88769	140,0937	5,654134441	-32,06618986	45,83124506	101,4979117
171	28,97219	139,5887	5,09364111	-32,15998428	44,17099397	99,83766064
172	29,04786	139,0824	4,531596208	-32,24398245	42,51374791	98,18041458
173	29,11469	138,5748	3,968170937	-32,31815879	40,85925943	96,5259261
174	29,17264	138,0662	3,403536922	-32,38249071	39,20727649	94,87394316
175	29,22171	137,5566	2,837866158	-32,43695861	37,55754259	93,22420925
176	29,26188	137,0462	2,271330952	-32,4815459	35,90979688	91,57646354
177	29,29313	136,5352	1,704103876	-32,51623899	34,2637743	89,93044096
178	29,31546	136,0237	1,136357714	-32,54102733	32,61920566	88,28587232

$\theta$ [°]	$x_0$ [m]	$y_0$ [m]	$v_{x0}$ [m/s]	$v_{y0}$ [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
179	29,32887	135,5119	0,568265407	-32,55590335	30,97581773	86,6424844
180	29,33333	135	3,98919E-15	-32,56086253	29,33333333	85

Tabella 7.1: Calcolo gittata massima

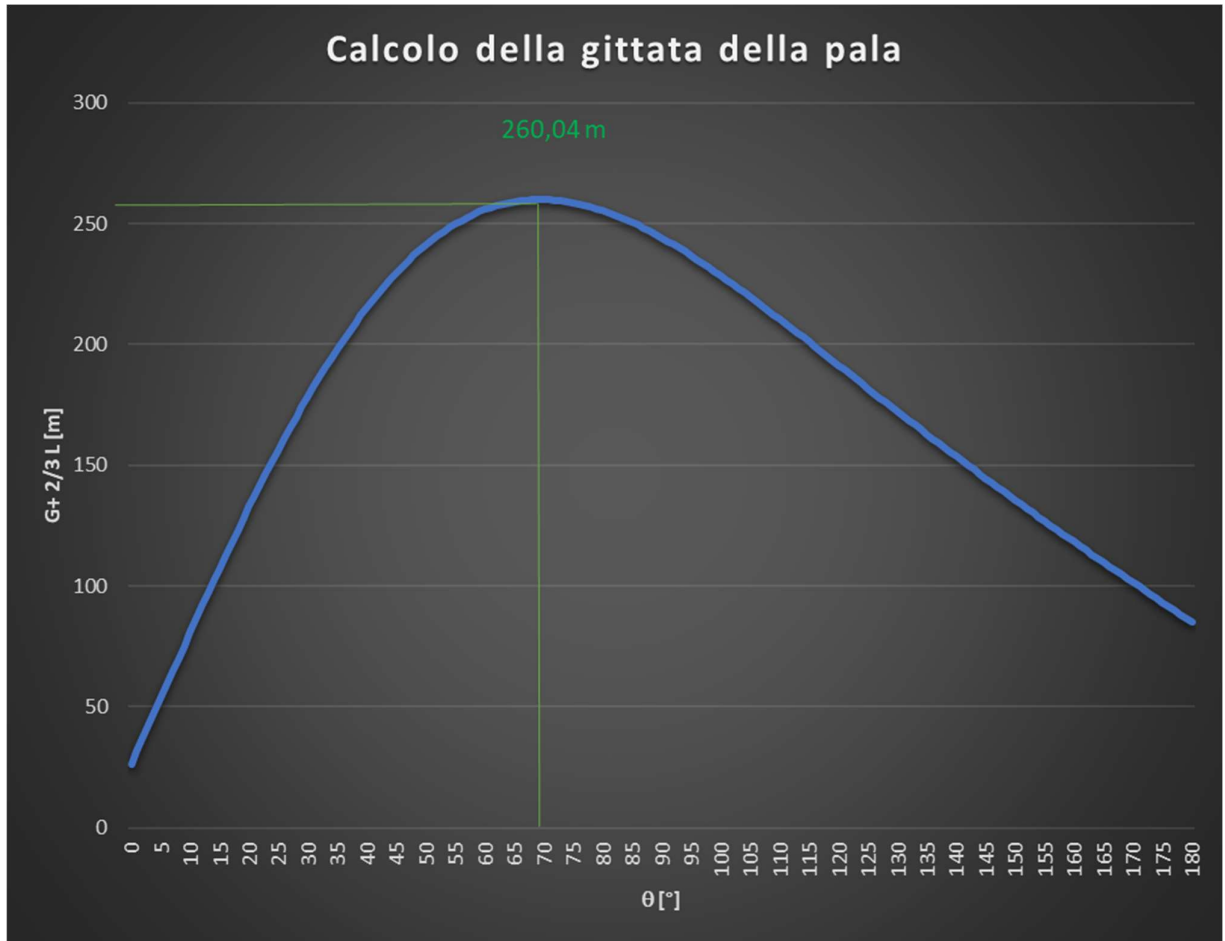


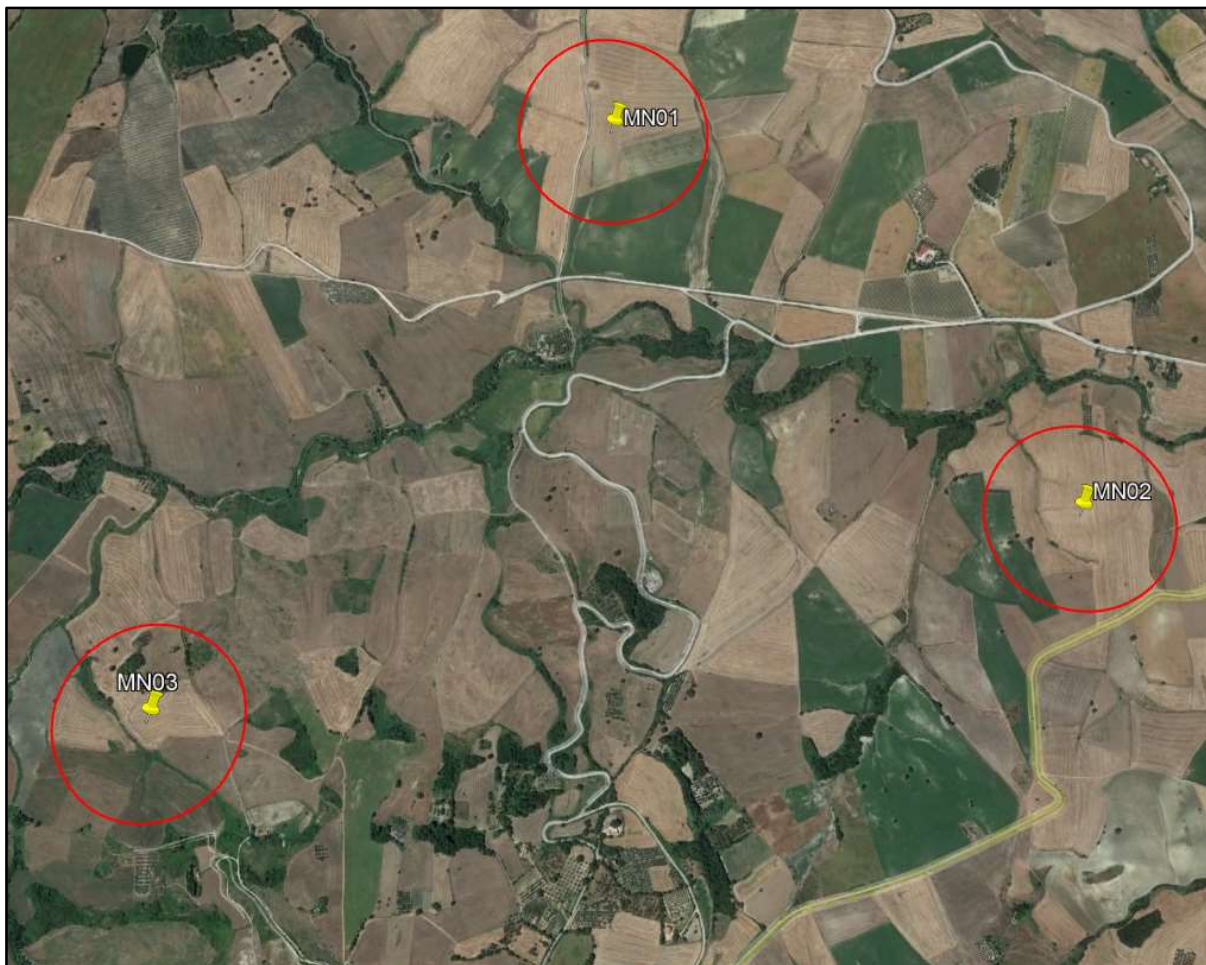
Figura 7.2: Rappresentazione grafica della gittata della pala e gittata massima

## 8. CONCLUSIONI

Nel caso di distacco in corrispondenza dell'angolo  $\theta = 69^\circ$  la pala raggiunge la sua gittata massima pari a circa 260 m.

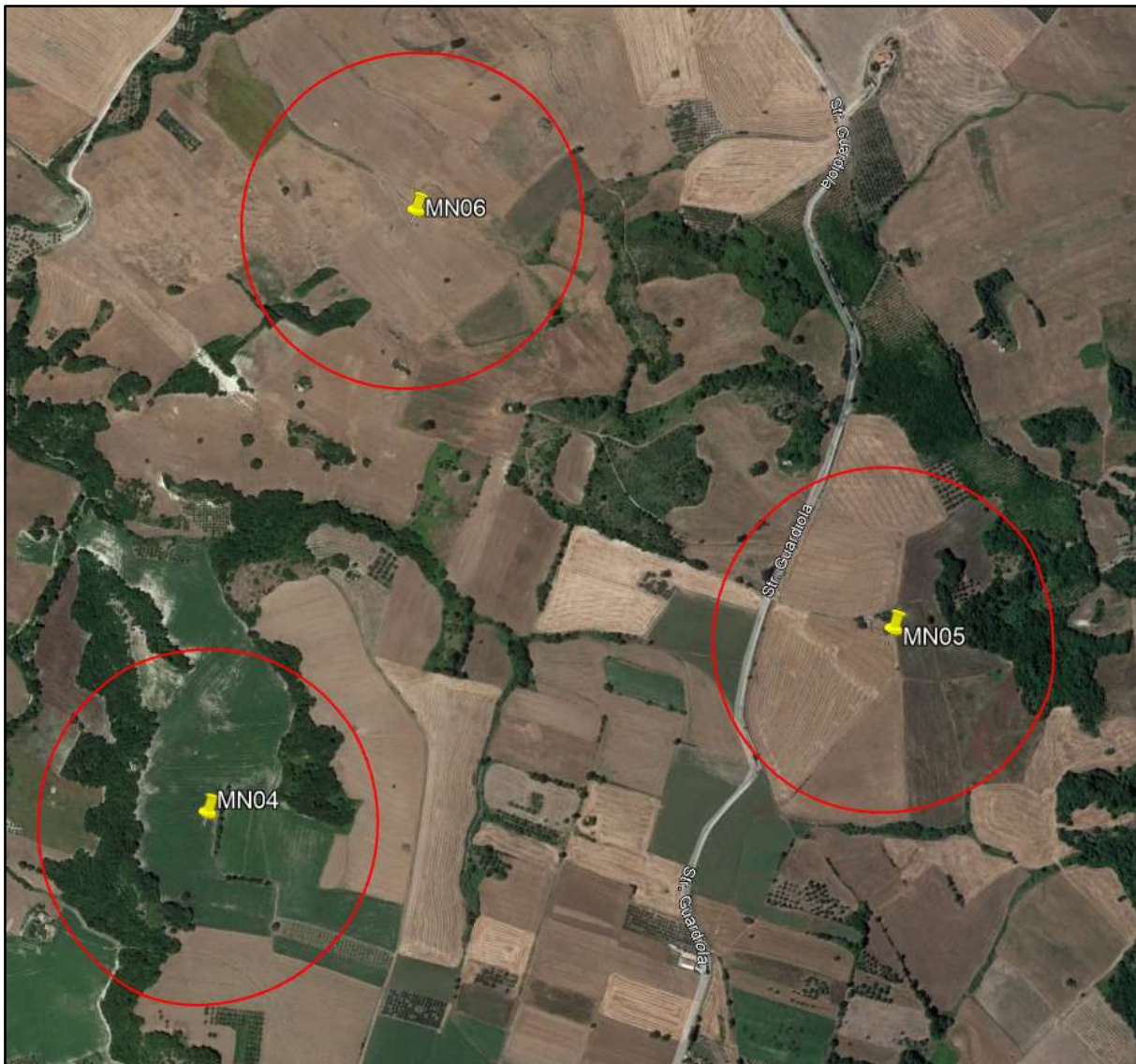
Tutto ciò è stato ottenuto in base alle ipotesi di sicurezza elencate nel paragrafo precedente, ovvero non considerando il moto della pala come rotazionale complesso nel caso di eventuale distacco e considerando quale velocità iniziale quella dipendente dalla massima frequenza di rotazione della pala; tuttavia, come discusso in precedenza, il valore della gittata massima nel caso teorico è superiore rispetto a quello che si otterrebbe nel caso in cui si prendessero in considerazione le forze di attrito viscoso e nel caso in cui l'eventuale distacco avvenisse 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.



**Figura 8.1:** Aree interessate dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori MN01, MN02 e MN03





**Figura 8.2:** Aree interessate dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori MN04, MN05 e MN06

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