

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



PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO LARINO

Titolo elaborato:

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

LT	GD	WPD	EMISSIONE	04/07/22	0	0
REDATTO	CONTR.	APPROV.	DESCRIZIONE REVISIONE DOCUMENTO	DATA	REV	

PROPONENTE



WPD FRENTANI S.R.L.
CORSO D'ITALIA N. 83
00198 ROMA

CONSULENZA



GE.CO.D'ORS.R.L.
VIA G. GARIBALDI N. 15
74023 GROTTAGLIE (TA)

PROGETTISTA

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

Codice
LARSA105

Formato
A4

Scala
/

Foglio
1 di 20

Sommaro

1.	PREMESSA	3
2.	CARATTERISTICHE TECNICHE DELL'AEROGENERATORE	3
3.	STUDI CONDOTTI SUGLI INCIDENTI	5
4.	CAUSE DI ROTTURAZIONE DELLA PALA O PARTE DI ESSA	6
5.	STUDIO DELLA GITTATA	7
6.	ANALISI TEORICA DEL MOTO DI ROTAZIONE COMPLESSO	8
7.	CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA	9
8.	CONCLUSIONI	17

1. PREMESSA

La seguente trattazione si riferisce al parco eolico caratterizzato da una potenza nominale totale pari a 84 MWp ed è costituito da 14 aerogeneratori di potenza nominale pari a 6 MWp, collegati tra loro mediante un sistema di cavidotti interrati a 36 kV, che si collega alla stazione elettrica di trasformazione (SE) della RTN 380/36 kV di Larino, previo ampliamento della sottostazione elettrica di trasformazione esistente SE RTN 380/150 kV.

L'impianto interessa prevalentemente il Comune di Larino, ove ricadono 12 aerogeneratori e le opere di connessione alla RTN, e il Comune di San Martino in Pensilis, ove ricadono 2 aerogeneratori.

Ciascuno degli aerogeneratori è installato su torre di altezza pari a 165 m e presenta un diametro del rotore di 170 m.

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 165 m e diametro del rotore 170 m (**Figura 2.1**).

Oltre ai componenti su elencati, un sistema di controllo 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, ha diametro pari a 170 metri ed è 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.

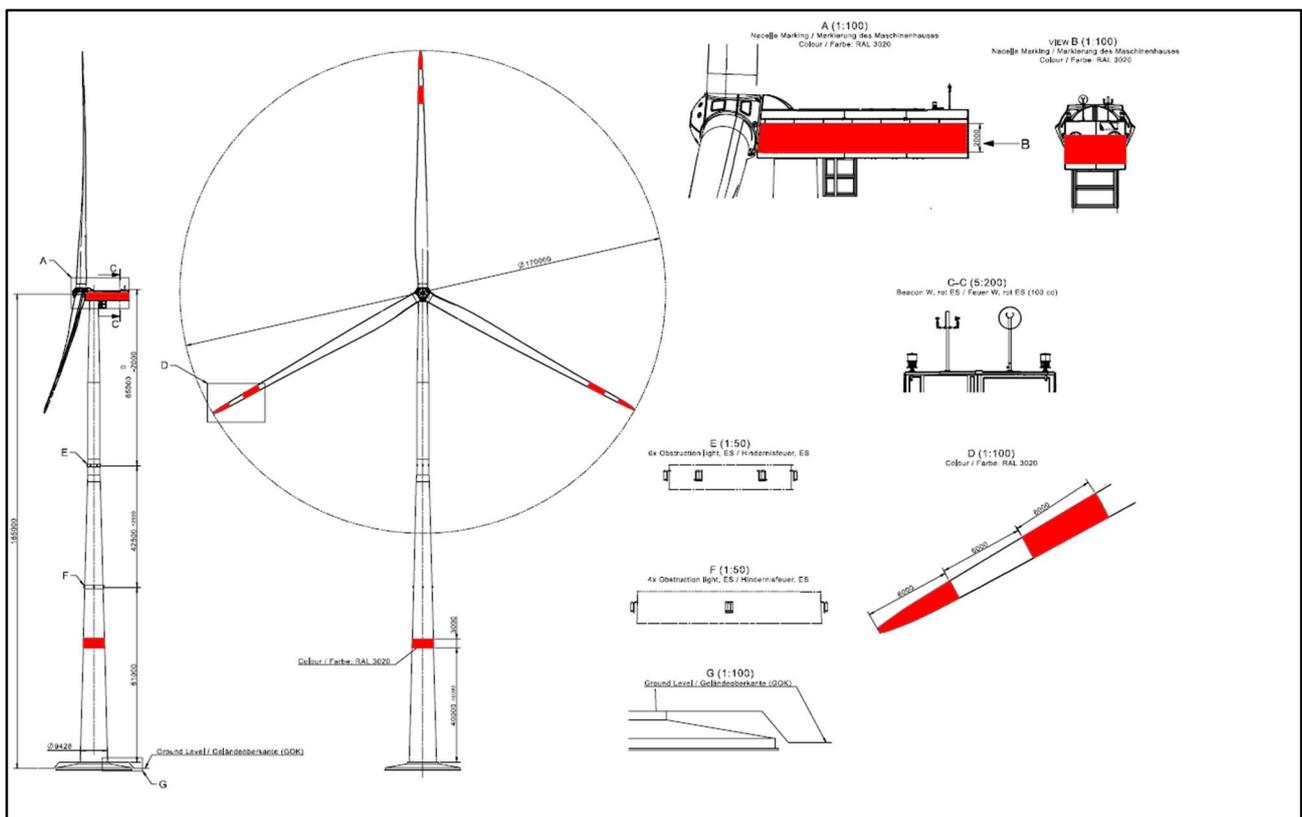


Figura 2.1: Profilo aerogeneratore SG170 – 6.0 MW

Rotor		Grid Terminals (LV)	
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 ²	Yaw System	
Power regulation.....	Pitch & torque regulation with variable speed	Type.....	Active
Rotor tilt.....	6 degrees	Yaw bearing.....	Externally geared
Blade		Yaw drive.....	Electric gear motors
Type.....	Self-supporting	Yaw brake.....	Active friction brake
Single piece blade length	83,3 m	Controller	
Segmented blade length:		Type.....	Siemens Integrated Control System (SICS)
Inboard module.....	68,33 m	SCADA system.....	Consolidated SCADA (CSSS)
Outboard module.....	15,04 m	Tower	
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.....	White, RAL 9018	Color.....	Semi-gloss, <30 / ISO-2813 Light grey, RAL 7035 or White, RAL 9018
Aerodynamic Brake		Operational Data	
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)
Load-Supporting Parts		Cut-out wind speed.....	25 m/s
Hub.....	Nodular cast iron	Restart wind speed.....	22 m/s
Main shaft.....	Nodular cast iron	Weight	
Nacelle bed frame.....	Nodular cast iron	Modular approach.....	Different modules depending on restriction
Mechanical Brake			
Type.....	Hydraulic disc brake		
Position.....	Gearbox rear end		
Nacelle Cover			
Type.....	Totally enclosed		
Surface gloss.....	Semi-gloss, <30 / ISO2813		
Color.....	Light Grey, RAL 7035 or White, RAL 9018		
Generator			
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 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 rotor, 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.

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 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.

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".

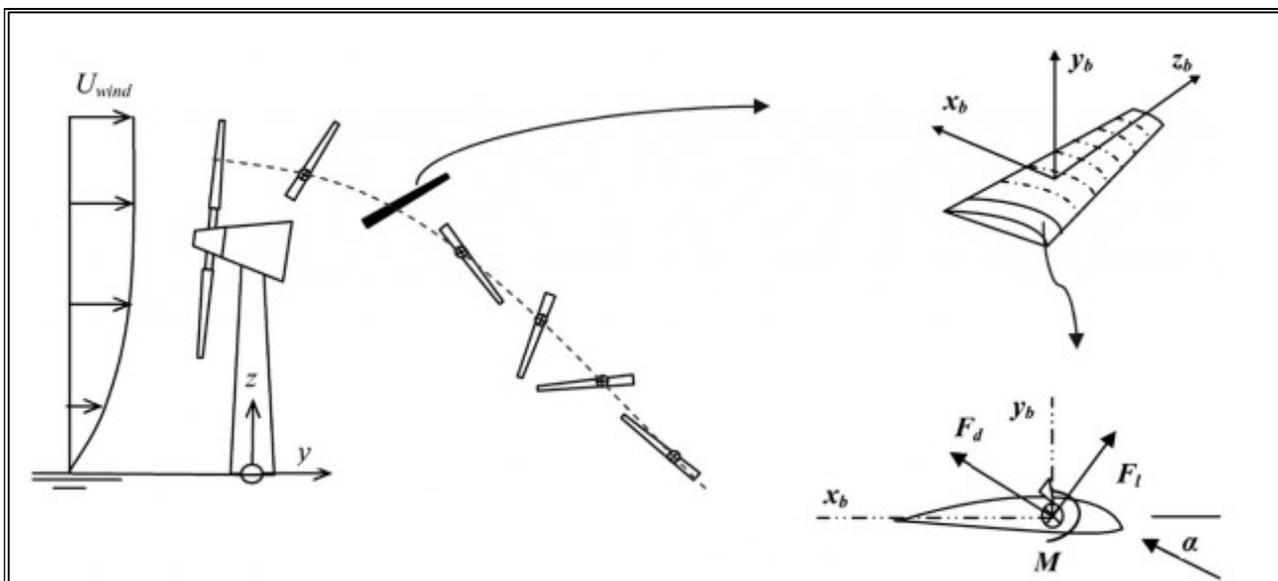


Figura 5.1: Traiettoria teorica pala in caso di rottura

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:

$$a_x = 0$$

$$a_y = -g$$

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 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

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

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

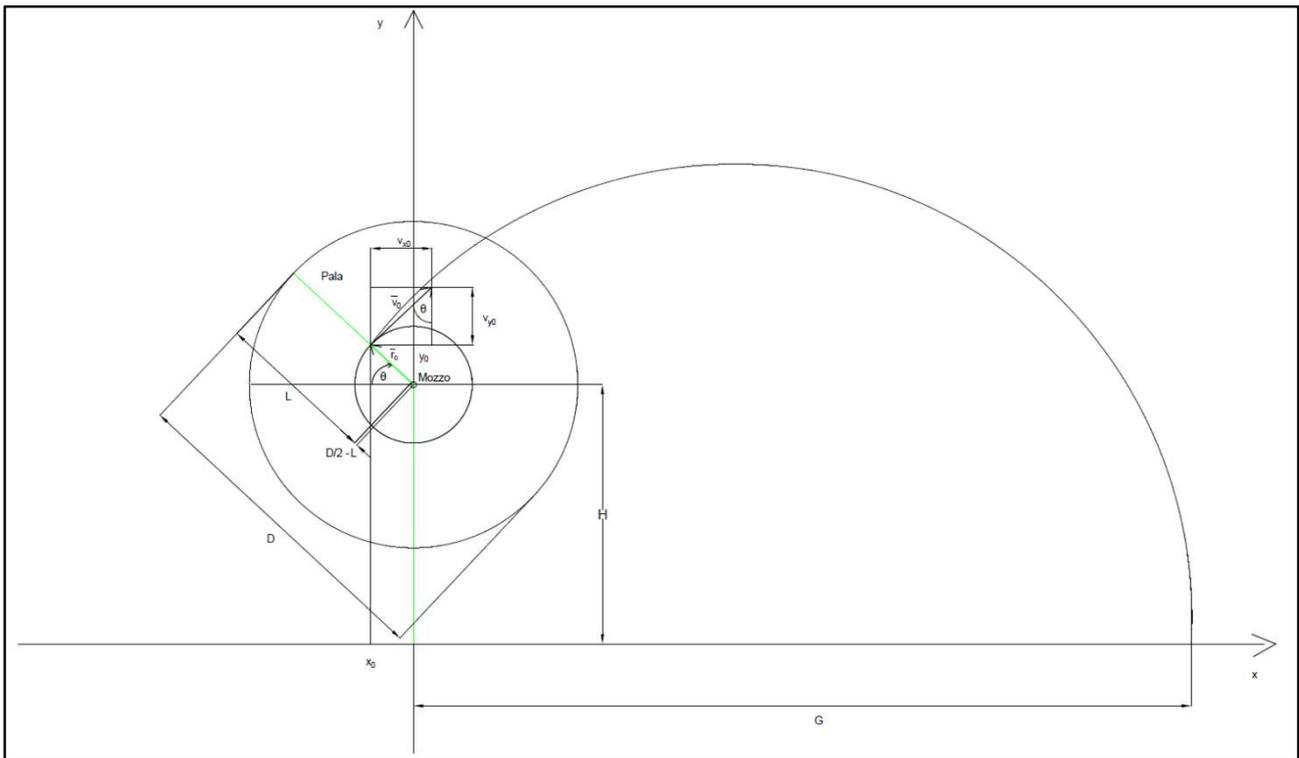


Figura 7.1: Rappresentazione geometrica del problema

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 la 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, la frequenza massima di rotazione del rotore è pari a 10,6 rpm.

Detta ω 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;
- $v_0 = 32,56 \text{ m/s}$, $r_b = 29,33 \text{ m}$, $\text{rpm} = 10,6 \text{ giri/min}$;
- $H = 165 \text{ m}$, $L = 83,5 \text{ m}$, $D = 170 \text{ m}$.

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

θ [°]	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	165	0	32,56086253	-29,33333333	26,33333333
1	-29,3289	165,5119	0,568265407	32,55590335	-23,63692355	32,02974312
2	-29,3155	166,0237	1,136357714	32,54102733	-17,92703393	37,73963274
3	-29,2931	166,5352	1,704103876	32,51623899	-12,20800303	43,45866364
4	-29,2619	167,0462	2,271330952	32,4815459	-6,484167996	49,18249867
5	-29,2217	167,5566	2,837866158	32,43695861	-0,759859108	54,90680756
6	-29,1726	168,0662	3,403536922	32,38249071	4,960605599	60,62727227
7	-29,1147	168,5748	3,968170937	32,31815879	10,6729257	66,33959237
8	-29,0479	169,0824	4,531596208	32,24398245	16,3728237	72,03949037
9	-28,9722	169,5887	5,09364111	32,15998428	22,05605031	77,72271698
10	-28,8877	170,0937	5,654134441	32,06618986	27,71838964	83,38505631
11	-28,7944	170,5971	6,212905467	31,96262777	33,35566436	89,02233103
12	-28,6923	171,0987	6,769783982	31,84932956	38,9637408	94,63040746
13	-28,5815	171,5986	7,324600355	31,72632973	44,53853388	100,2052005
14	-28,462	172,0964	7,877185584	31,59366575	50,0760121	105,7426788
15	-28,3338	172,592	8,427371346	31,45137804	55,57220232	111,238869
16	-28,197	173,0854	8,97499005	31,29950993	61,02319447	116,6898611
17	-28,0516	173,5762	9,519874884	31,13810769	66,42514616	122,0918128
18	-27,8977	174,0645	10,06185987	30,96722048	71,7742872	127,4409539
19	-27,7352	174,55	10,60077992	30,78690036	77,06692397	132,7335906
20	-27,5643	175,0326	11,13647087	30,59720224	82,29944365	137,9661103
21	-27,385	175,5121	11,66876954	30,39818392	87,46831834	143,134985
22	-27,1974	175,9885	12,19751379	30,18990602	92,57010906	148,2367757
23	-27,0015	176,4614	12,72254256	29,97243199	97,60146953	153,2681362
24	-26,7973	176,9309	13,24369592	29,74582806	102,5591499	158,2258166
25	-26,585	177,3968	13,76081512	29,51016326	107,4400003	163,106667
26	-26,3646	177,8589	14,27374265	29,26550938	112,240974	167,9076407
27	-26,1362	178,3171	14,78232225	29,01194094	116,959131	172,6257976
28	-25,8998	178,7712	15,28639902	28,74953519	121,5916404	177,2583071
29	-25,6555	179,2211	15,7858194	28,47837205	126,1357842	181,8024508
30	-25,4034	179,6667	16,28043126	28,19853412	130,5889588	186,2556254
31	-25,1436	180,1078	16,77008395	27,91010664	134,9486784	190,6153451
32	-24,8761	180,5443	17,25462831	27,61317747	139,2125769	194,8792436
33	-24,601	180,9761	17,73391674	27,30783707	143,3784101	199,0450768
34	-24,3184	181,403	18,20780325	26,99417843	147,4440573	203,110724
35	-24,0285	181,8249	18,67614349	26,6722971	151,4075234	207,07419

θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	v_{x0} [m/s]	v_{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
36	-23,7312	182,2417	19,13879479	26,34229113	155,2669399	210,9336066
37	-23,4266	182,6532	19,59561623	26,00426105	159,0205669	214,6872336
38	-23,115	183,0594	20,04646866	25,65830982	162,6667933	218,33346
39	-22,7963	183,4601	20,49121474	25,30454281	166,2041383	221,870805
40	-22,4706	183,8551	20,92971899	24,9430678	169,6312517	225,2979184
41	-22,1381	184,2444	21,36184785	24,57399489	172,9469145	228,6135811
42	-21,7989	184,6278	21,78746969	24,1974365	176,1500389	231,8167055
43	-21,453	185,0053	22,20645484	23,81350734	179,2396686	234,9063353
44	-21,1006	185,3766	22,6186757	23,42232435	182,2149784	237,8816451
45	-20,7418	185,7418	23,02400669	23,02400669	185,0752738	240,7419404
46	-20,3766	186,1006	23,42232435	22,6186757	187,8199901	243,4866567
47	-20,0053	186,453	23,81350734	22,20645484	190,448692	246,1153587
48	-19,6278	186,7989	24,1974365	21,78746969	192,9610723	248,627739
49	-19,2444	187,1381	24,57399489	21,36184785	195,3569506	251,0236172
50	-18,8551	187,4706	24,9430678	20,92971899	197,6362716	253,3029382
51	-18,4601	187,7963	25,30454281	20,49121474	199,7991038	255,4657705
52	-18,0594	188,115	25,65830982	20,04646866	201,8456376	257,5123042
53	-17,6532	188,4266	26,00426105	19,59561623	203,7761827	259,4428494
54	-17,2417	188,7312	26,34229113	19,13879479	205,5911664	261,257833
55	-16,8249	189,0285	26,6722971	18,67614349	207,2911308	262,9577975
56	-16,403	189,3184	26,99417843	18,20780325	208,8767303	264,543397
57	-15,9761	189,601	27,30783707	17,73391674	210,3487288	266,0153954
58	-15,5443	189,8761	27,61317747	17,25462831	211,7079964	267,3746631
59	-15,1078	190,1436	27,91010664	16,77008395	212,9555068	268,6221734
60	-14,6667	190,4034	28,19853412	16,28043126	214,0923334	269,759
61	-14,2211	190,6555	28,47837205	15,7858194	215,1196463	270,786313
62	-13,7712	190,8998	28,74953519	15,28639902	216,0387086	271,7053753
63	-13,3171	191,1362	29,01194094	14,78232225	216,8508725	272,5175392
64	-12,8589	191,3646	29,26550938	14,27374265	217,5575757	273,2242424
65	-12,3968	191,585	29,51016326	13,76081512	218,1603374	273,8270041
66	-11,9309	191,7973	29,74582806	13,24369592	218,6607541	274,3274208
67	-11,4614	192,0015	29,97243199	12,72254256	219,0604957	274,7271624
68	-10,9885	192,1974	30,18990602	12,19751379	219,3613012	275,0279679
69	-10,5121	192,385	30,39818392	11,66876954	219,5649743	275,231641
70	-10,0326	192,5643	30,59720224	11,13647087	219,6733794	275,340046
71	-9,55	192,7352	30,78690036	10,60077992	219,6884367	275,3551034
72	-9,0645	192,8977	30,96722048	10,06185987	219,6121185	275,2787851

θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	v_{x0} [m/s]	v_{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
73	-8,57624	193,0516	31,13810769	9,519874884	219,446444	275,1131107
74	-8,08536	193,197	31,29950993	8,97499005	219,1934756	274,8601423
75	-7,59203	193,3338	31,45137804	8,427371346	218,8553139	274,5219806
76	-7,09638	193,462	31,59366575	7,877185584	218,4340935	274,1007601
77	-6,59856	193,5815	31,72632973	7,324600355	217,9319786	273,5986453
78	-6,09874	193,6923	31,84932956	6,769783982	217,3511588	273,0178255
79	-5,59706	193,7944	31,96262777	6,212905467	216,6938444	272,3605111
80	-5,09368	193,8877	32,06618986	5,654134441	215,9622627	271,6289293
81	-4,58874	193,9722	32,15998428	5,09364111	215,1586531	270,8253198
82	-4,08241	194,0479	32,24398245	4,531596208	214,2852637	269,9519304
83	-3,57483	194,1147	32,31815879	3,968170937	213,344347	269,0110137
84	-3,06617	194,1726	32,38249071	3,403536922	212,3381559	268,0048226
85	-2,55657	194,2217	32,43695861	2,837866158	211,26894	266,9356067
86	-2,04619	194,2619	32,4815459	2,271330952	210,138942	265,8056086
87	-1,53519	194,2931	32,51623899	1,704103876	208,9503939	264,6170606
88	-1,02372	194,3155	32,54102733	1,136357714	207,7055139	263,3721806
89	-0,51194	194,3289	32,55590335	0,568265407	206,406503	262,0731697
90	-1,8E-15	194,3333	32,56086253	1,99459E-15	205,0555417	260,7222083
91	0,511937	194,3289	32,55590335	-0,568265407	203,654787	259,3214537
92	1,023719	194,3155	32,54102733	-1,136357714	202,20637	257,8730366
93	1,535188	194,2931	32,51623899	-1,704103876	200,7123927	256,3790593
94	2,04619	194,2619	32,4815459	-2,271330952	199,1749257	254,8415924
95	2,556568	194,2217	32,43695861	-2,837866158	197,5960061	253,2626727
96	3,066168	194,1726	32,38249071	-3,403536922	195,9776347	251,6443014
97	3,574834	194,1147	32,31815879	-3,968170937	194,3217747	249,9884413
98	4,082411	194,0479	32,24398245	-4,531596208	192,6303492	248,2970159
99	4,588744	193,9722	32,15998428	-5,09364111	190,9052401	246,5719067
100	5,09368	193,8877	32,06618986	-5,654134441	189,148286	244,8149527
101	5,597064	193,7944	31,96262777	-6,212905467	187,3612814	243,0279481
102	6,098743	193,6923	31,84932956	-6,769783982	185,545975	241,2126417
103	6,598564	193,5815	31,72632973	-7,324600355	183,7040692	239,3707358
104	7,096376	193,462	31,59366575	-7,877185584	181,8372185	237,5038851
105	7,592025	193,3338	31,45137804	-8,427371346	179,9470294	235,6136961
106	8,085362	193,197	31,29950993	-8,97499005	178,0350596	233,7017263
107	8,576237	193,0516	31,13810769	-9,519874884	176,1028175	231,7694842
108	9,064499	192,8977	30,96722048	-10,06185987	174,1517618	229,8184285
109	9,549999	192,7352	30,78690036	-10,60077992	172,1833014	227,8499681

θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	v_{x0} [m/s]	v_{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
110	10,03259	192,5643	30,59720224	-11,13647087	170,1987955	225,8654622
111	10,51213	192,385	30,39818392	-11,66876954	168,1995534	223,86622
112	10,98846	192,1974	30,18990602	-12,19751379	166,1868346	221,8535013
113	11,46145	192,0015	29,97243199	-12,72254256	164,1618495	219,8285162
114	11,93094	191,7973	29,74582806	-13,24369592	162,1257593	217,792426
115	12,3968	191,585	29,51016326	-13,76081512	160,0796766	215,7463433
116	12,85889	191,3646	29,26550938	-14,27374265	158,0246662	213,6913328
117	13,31705	191,1362	29,01194094	-14,78232225	155,9617451	211,6284117
118	13,77117	190,8998	28,74953519	-15,28639902	153,8918839	209,5585505
119	14,22108	190,6555	28,47837205	-15,7858194	151,816007	207,4826737
120	14,66667	190,4034	28,19853412	-16,28043126	149,734994	205,4016606
121	15,10778	190,1436	27,91010664	-16,77008395	147,6496796	203,3163463
122	15,5443	189,8761	27,61317747	-17,25462831	145,5608557	201,2275224
123	15,97608	189,601	27,30783707	-17,73391674	143,4692714	199,1359381
124	16,40299	189,3184	26,99417843	-18,20780325	141,3756344	197,0423011
125	16,82491	189,0285	26,6722971	-18,67614349	139,2806121	194,9472788
126	17,2417	188,7312	26,34229113	-19,13879479	137,1848323	192,8514989
127	17,65324	188,4266	26,00426105	-19,59561623	135,0888844	190,7555511
128	18,0594	188,115	25,65830982	-20,04646866	132,9933209	188,6599876
129	18,46006	187,7963	25,30454281	-20,49121474	130,8986578	186,5653245
130	18,8551	187,4706	24,9430678	-20,92971899	128,805376	184,4720427
131	19,2444	187,1381	24,57399489	-21,36184785	126,7139225	182,3805891
132	19,62783	186,7989	24,1974365	-21,78746969	124,6247113	180,291378
133	20,00529	186,453	23,81350734	-22,20645484	122,5381247	178,2047913
134	20,37665	186,1006	23,42232435	-22,6186757	120,4545141	176,1211807
135	20,7418	185,7418	23,02400669	-23,02400669	118,3742013	174,040868
136	21,10063	185,3766	22,6186757	-23,42232435	116,2974796	171,9641463
137	21,45304	185,0053	22,20645484	-23,81350734	114,2246146	169,8912813
138	21,79891	184,6278	21,78746969	-24,1974365	112,1558453	167,822512
139	22,13815	184,2444	21,36184785	-24,57399489	110,0913854	165,758052
140	22,47064	183,8551	20,92971899	-24,9430678	108,0314237	163,6980904
141	22,79628	183,4601	20,49121474	-25,30454281	105,9761258	161,6427924
142	23,11498	183,0594	20,04646866	-25,65830982	103,9256344	159,592301
143	23,42664	182,6532	19,59561623	-26,00426105	101,8800706	157,5467372
144	23,73117	182,2417	19,13879479	-26,34229113	99,83953469	155,5062014
145	24,02846	181,8249	18,67614349	-26,6722971	97,80410698	153,4707736
146	24,31844	181,403	18,20780325	-26,99417843	95,77384868	151,4405153

θ [°]	x_0 [m]	y_0 [m]	v_{x0} [m/s]	v_{y0} [m/s]	Gittata G [m]	Gittata + 2/3 L [m]
147	24,601	180,9761	17,73391674	-27,30783707	93,74880268	149,4154693
148	24,87608	180,5443	17,25462831	-27,61317747	91,72899441	147,3956611
149	25,14357	180,1078	16,77008395	-27,91010664	89,71443253	145,3810992
150	25,40341	179,6667	16,28043126	-28,19853412	87,70510972	143,3717764
151	25,65551	179,2211	15,7858194	-28,47837205	85,70100334	141,36767
152	25,8998	178,7712	15,28639902	-28,74953519	83,70207615	139,3687428
153	26,13619	178,3171	14,78232225	-29,01194094	81,70827696	137,3749436
154	26,36463	177,8589	14,27374265	-29,26550938	79,71954121	135,3862079
155	26,58503	177,3968	13,76081512	-29,51016326	77,73579166	133,4024583
156	26,79733	176,9309	13,24369592	-29,74582806	75,75693888	131,4236055
157	27,00148	176,4614	12,72254256	-29,97243199	73,78288184	129,4495485
158	27,19739	175,9885	12,19751379	-30,18990602	71,81350845	127,4801751
159	27,38503	175,5121	11,66876954	-30,39818392	69,84869603	125,5153627
160	27,56432	175,0326	11,13647087	-30,59720224	67,88831181	123,5549785
161	27,73521	174,55	10,60077992	-30,78690036	65,93221339	121,5988801
162	27,89766	174,0645	10,06185987	-30,96722048	63,98024913	119,6469158
163	28,05161	173,5762	9,519874884	-31,13810769	62,03225864	117,6989253
164	28,19701	173,0854	8,97499005	-31,29950993	60,0880731	115,7547398
165	28,33382	172,592	8,427371346	-31,45137804	58,14751568	113,8141823
166	28,46201	172,0964	7,877185584	-31,59366575	56,21040184	111,8770685
167	28,58152	171,5986	7,324600355	-31,72632973	54,27653972	109,9432064
168	28,69233	171,0987	6,769783982	-31,84932956	52,34573043	108,0123971
169	28,7944	170,5971	6,212905467	-31,96262777	50,41776835	106,084435
170	28,88769	170,0937	5,654134441	-32,06618986	48,49244139	104,1591081
171	28,97219	169,5887	5,09364111	-32,15998428	46,56953132	102,236198
172	29,04786	169,0824	4,531596208	-32,24398245	44,64881396	100,3154806
173	29,11469	168,5748	3,968170937	-32,31815879	42,73005943	98,3967261
174	29,17264	168,0662	3,403536922	-32,38249071	40,81303242	96,47969908
175	29,22171	167,5566	2,837866158	-32,43695861	38,89749234	94,56415901
176	29,26188	167,0462	2,271330952	-32,4815459	36,98319359	92,64986025
177	29,29313	166,5352	1,704103876	-32,51623899	35,06988568	90,73655235
178	29,31546	166,0237	1,136357714	-32,54102733	33,15731348	88,82398015
179	29,32887	165,5119	0,568265407	-32,55590335	31,24521736	86,91188402
180	29,33333	165	3,98919E-15	-32,56086253	29,33333333	85

Tabella 7.1: Calcolo gittata massima

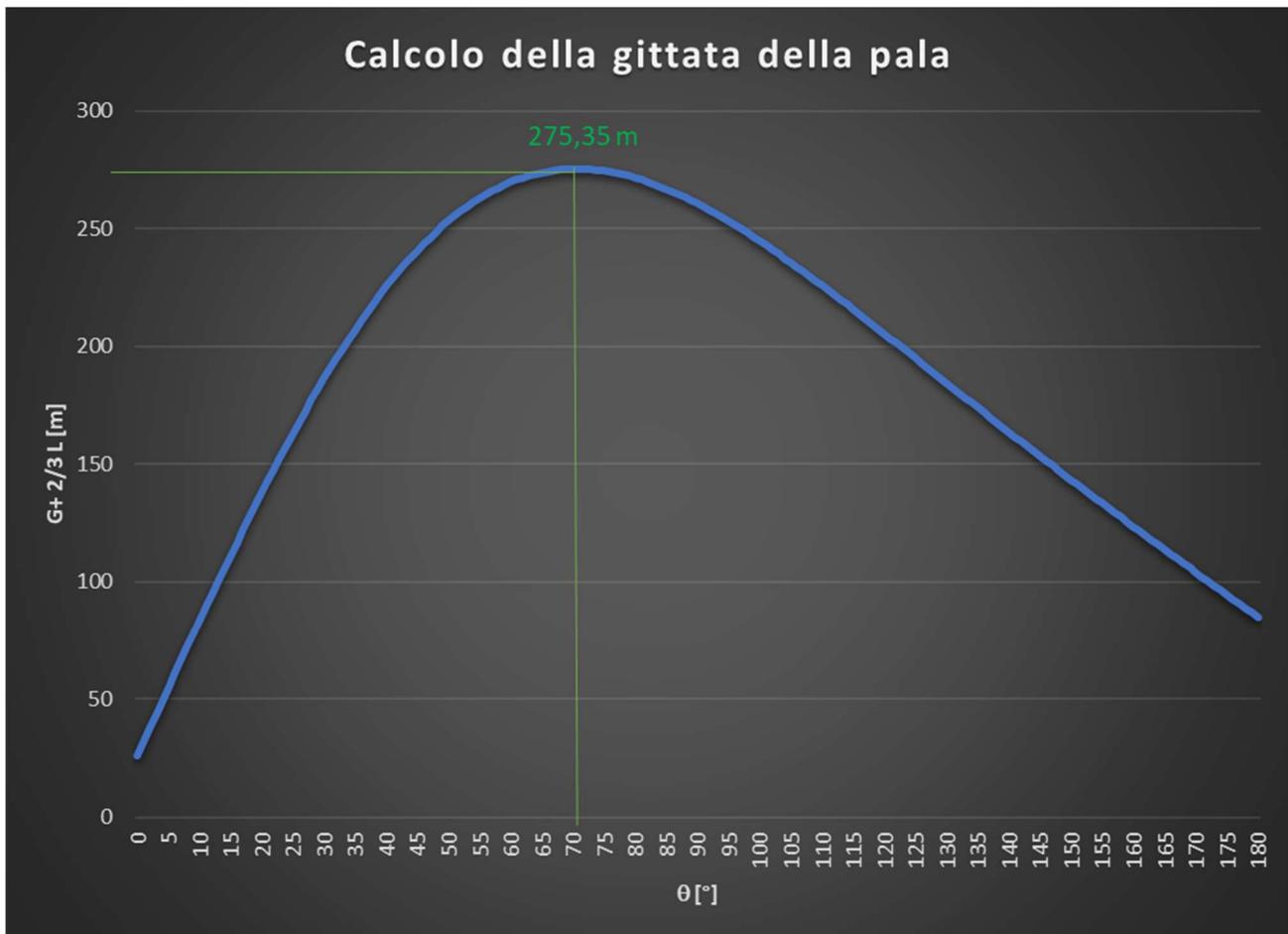


Figura 7.2: Rappresentazione grafica della gittata della pala e gittata massima

8. CONCLUSIONI

Nel caso di distacco in corrispondenza dell'angolo $\theta = 71^\circ$ la pala raggiunge la sua gittata massima pari a 275,35 m.

Tutto ciò è stato ottenuto in base alle ipotesi 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.

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 interessata dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori LAR 14, LAR 13, LAR 02 e LAR 03



Figura 8.2: Aree interessata dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori LAR 01, LAR 08 e LAR 04

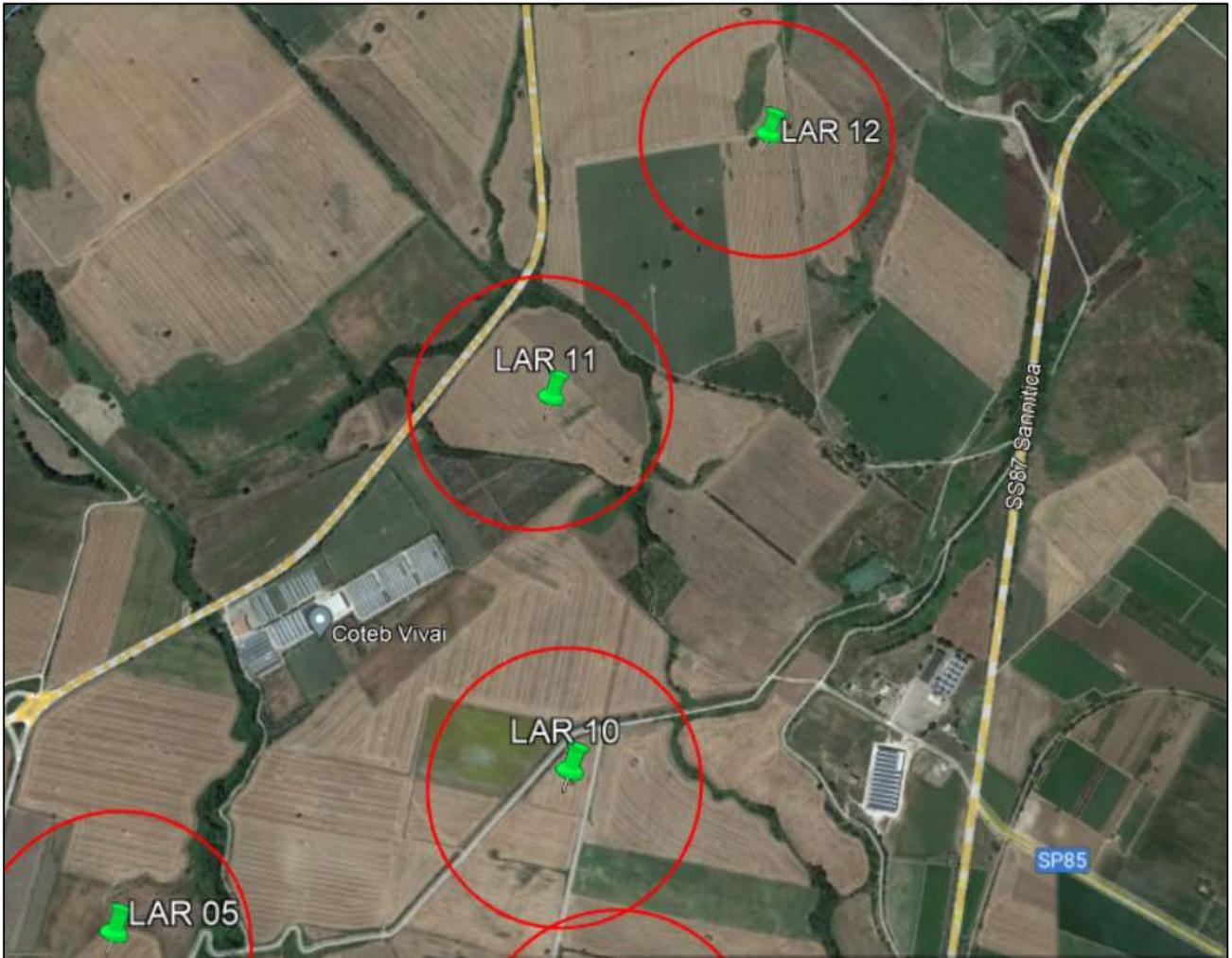


Figura 8.3: Area interessata dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori LAR 10, LAR 11 e LAR 12

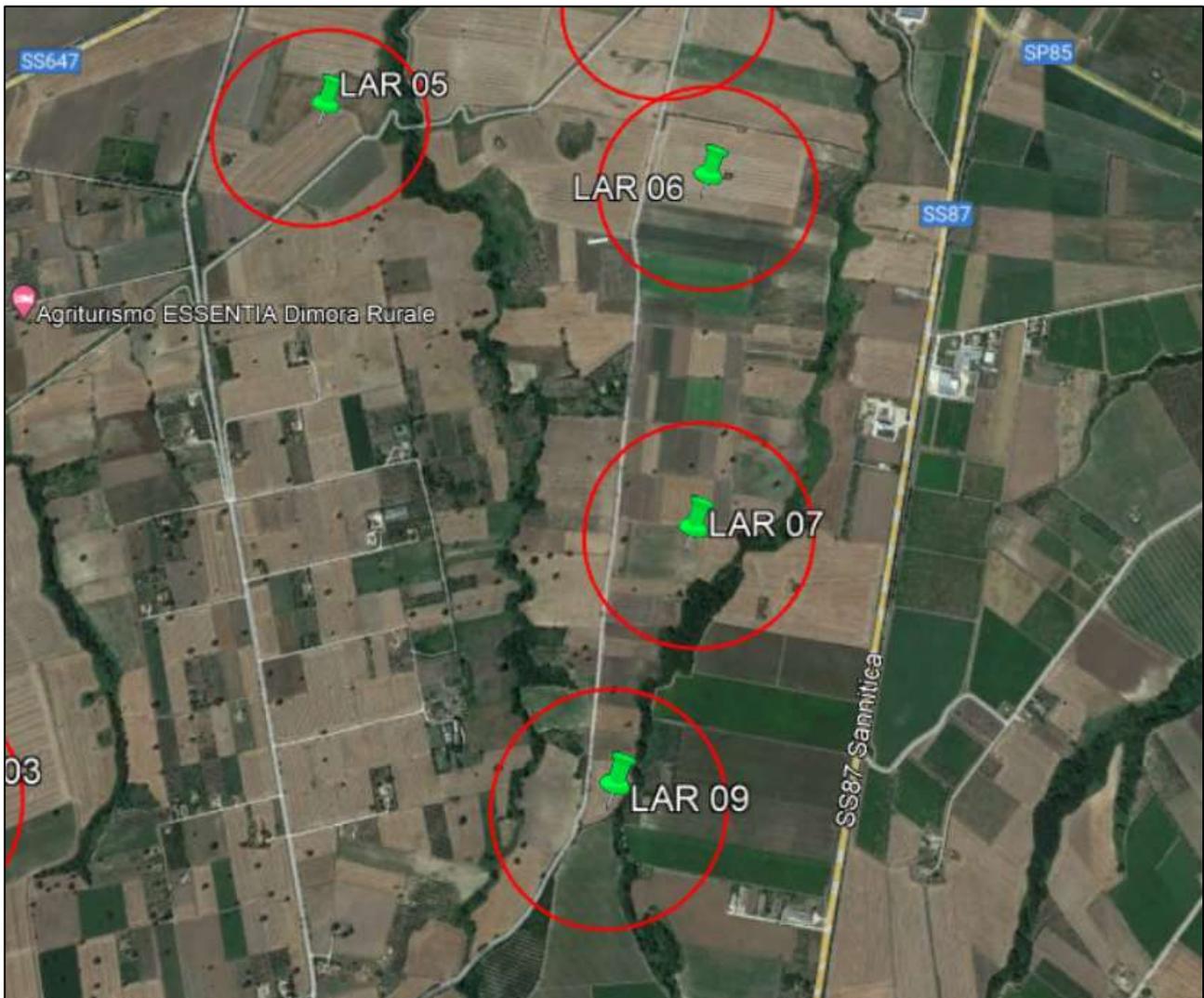


Figura 8.4: Area interessata dalla rottura della pala relativamente agli aerogeneratori LAR 09, LAR 07, LAR 06 e LAR 05

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 edifici, o strade interessate dal passaggio frequente di mezzi (strade statali, strade provinciali, strade comunali verso centri abitati).