REGIONE LIGURIA

REGIONE LIGURIA

PROVINCIA DI SAVONA

COMUNE DI CAIRO MONTENOTTE

OGGETTO

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO COMPOSTO DA 7 AEROGENERATORI PER UNA POTENZA COMPLESSIVA PARI A 29,4 MW DENOMINATO "BRIC MUND" DA REALIZZARSI NEL COMUNE DI CAIRO MONTENOTTE (SV) IN LOCALITÁ CAMPONUOVO E DELLE OPERE CONNESSE E INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI ALL'ESERCIZIO DELLE STESSE SITE NEI TERRITORI DI CARCARE (SV), ALTARE (SV) E MALLARE (SV)

PROGETTO DEFINITIVO

PROPONENTE

Statkraft

SKI W A3 S.R.L.
Società soggetta ad attività di direzione e coordinamento di Statkraft AS

Partita IVA 11412940964
C.F. 12655750961

Foro Buonaparte 60
20121 Milano

TITOLO

RELAZIONE DI GITTATA MASSIMA

PROGETTISTA

Dott. Ing. Girolamo Gorgone

Collaboratori

Ing. Gioacchino Ruisi
Ing. Giuseppina Brucato
Ing. Francesco Lipari
Dott. Agr. e For. Michele Virzì
Dott. Haritiana Ratsimba
Dott. Andrea Licata
Dott. Federica Ferrante
Dott. Annalisa Scardamaglia
Barbara Gorgone

CODICE ELABORATO

SKC_R_18_A_D_A_1

SCALA

Girolamo Gorgone
15.12.2025 18:58:11 GMT+02:00

n°.Rev.	DESCRIZIONE REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO

Rif. PROGETTO

N.

NOME FILE DI STAMPA

SCALA DI STAMPA DA FILE

COPYRIGHT STATKRAFT- TUTTI I DIRITTI SONO RISERVATI A NORMA DI LEGGE

Sommario

1 PREMESSA 3

2 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI 5

3 ANALISI TEORICA 7

4 ELEMENTI DI ANALISI DELLA MASSIMA GITTATA 8

4.1 Traiettoria 8

4.2 Tempo di volo 8

5 ELEMENTI DI DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA DISTANZA PERCORRIBILE 9

6 STIMA DELLA DISTANZA MASSIMA PERCORRIBILE 9

7 DATI SPERIMENTALI E CONCLUSIONE 15

1 PREMESSA

Il presente documento costituisce la **Relazione di gittata massima**, relativa al Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto eolico composto da 7 aerogeneratori da 4,2 MW ciascuno, per una potenza nominale complessiva di 29,4 MW. Ogni aerogeneratore, servito da un piazzale di sosta e manovra, è collegato agli altri mediante piste di accesso (in parte su tracciati viari già esistenti) necessarie tanto all'attività di realizzazione che di successiva manutenzione dell'impianto. Un cavidotto interrato in media tensione collegherà le turbine alla futura Stazione Elettrica (SE) di Trasformazione a 380/132/36 kV da inserire in entra - esce alla linea RTN a 380 kV "Magliano - Vado Ligure".

L'area interessata dal parco eolico ricade nella provincia di Savona in Liguria e più specificatamente nel territorio comunale di Cairo Montenotte (SV), il cavidotto di connessione ricade interamente nei territori di Cairo Montenotte (SV), Carcare (SV), Altare (SV) e Mallare (SV). La futura stazione di connessione alla RTN si localizza nel territorio di Mallare (SV) in località Peirano.

L'azienda proponente l'iniziativa è la **SKI W A3 S.r.l.,** società controllata da **Statkraft Italia S.r.l.**, società internazionale leader nel settore idroelettrico e il più grande produttore di energia rinnovabile in Europa. Il Gruppo produce energia idroelettrica, eolica, solare, da gas e fornisce teleriscaldamento. Statkraft è un'azienda globale nella gestione dei mercati elettrici e conta oltre 6000 dipendenti in più di 20 paesi tra cui l'Italia.

La presente viene redatta per Valutare e stimare l'eventuale area interessata da una possibile rottura degli organi rotanti anche in concomitanza delle norme di cui *all'art. 66 comma 9 del D.P.R. 495/92.*

All'interno dell'elaborato saranno quindi valutati gli effetti e le distanze massime percorribili che avrebbe la rottura accidentale degli organi rotanti degli aerogeneratori.

La tabella sottostante fornisce una panoramica generale del progetto in oggetto e degli elementi costituenti, corredata dalla specifica dislocazione delle postazioni macchina previste.

Tabella 1. Inquadramento delle opere

INQUADRAMENTO TERRITORIALE						
	PARCO EOLICO					PUNTO DI CONNESSIONE
Località impianto	Camponuovo					Peirano
Comuni interessati	Cairo Montenotte (SV)					Mallare (SV)
Inquadramento CTR	211160 Rocchetta Cairo 212130 Giusvalla 228040 Cairo Montenotte 229010 Pra Sottano					228080 Pallare
Inquadramento IGM	81 II-SO Cairo Montenotte 81 II-SE Altare					92 I-NO Mallare
CARATTERISTICHE DELLE TURBINE						
Modello	Vestas V150 o similare/equivalente					
Potenza nominale	4,5 MW Limitate 4,2 MW					
Dimensioni	Altezza del mozzo dal piano di campagna: fino a 105 m					
	Diametro del rotore fino a 150 m					
	Altezza totale dell'aerogeneratore: fino a 180 m					
NUMERO E LOCALIZZAZIONE DELLE TURBINE						
Codice turbina	Comune	Foglio	Particella	Coordinate WGS84 (Lat. - Long.)		Quota (m s.l.m.)
CM-01	Cairo Montenotte (SV)	38	81	44°24'5.18"N	8°19'36.40"E	660,21
CM-02	Cairo Montenotte (SV)	55	3	44°23'44.59"N	8°20'0.72"E	658,14
CM-03	Cairo Montenotte (SV)	54	24	44°23'28.07"N	8°19'24.66"E	601,67
CM-04	Cairo Montenotte (SV)	53	113	44°23'31.36"N	8°18'53.21"E	613,48
CM-05	Cairo Montenotte (SV)	54	35	44°23'4.49"N	8°19'19.88"E	538,05
CM-06	Cairo Montenotte (SV)	72	152	44°22'49.81"N	8°19'17.16"E	557,08
CM-07	Cairo Montenotte (SV)	72	152	44°22'34.43"N	8°19'12.39"E	573,90

Nella successiva fase di progettazione esecutiva le specifiche tecniche delle turbine eoliche potranno variare sulla base di valutazioni tecniche, ottimizzazioni progettuali, disponibilità di mercato ed evoluzione dell'offerta commerciale al momento dell'approvvigionamento. Tali possibili variazioni, tuttavia, non inficeranno le caratteristiche progettuali di base (e.g. caratteristiche dimensionali) e le relative valutazioni ambientali presentate in questa fase.

Sarà posta particolare attenzione alla postazione macchina identificata con il codice CM-07 che si localizza ad una distanza di circa 395,50 m dalla strada provinciale SP36 Via Italia alle coordinate 44°22'21.65"N - 8°19'10.82"E.

In una prima analisi teorica del problema si analizzeranno tutti i fattori che concorrono a determinare la gittata massima degli elementi, con l'applicazione ad un tipo di macchine coerenti con la tipologia di macchine previste in progetto.

2 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Le parti maggiormente esposte a rischio sono ovviamente le pale degli aerogeneratori. Queste, assieme al mozzo al quale sono fissate, costituiscono il rotore che viene collegato ad un albero motore, detto "lento".

In un primo momento non viene applicata l'azione del moltiplicatore di giri e pertanto l'albero lento ruota alla stessa velocità angolare del rotore. Successivamente avremo il moltiplicatore di giri e quindi tutta la componentistica elettromeccanica che serve per la conversione dell'energia cinetica in energia elettrica.

Caratteristica necessaria per il corretto funzionamento degli aerogeneratori, di qualsiasi scala, è che l'azione del vento sia perpendicolare al piano del rotore, pertanto, considerando inoltre il verso della velocità tangenziale dell'elemento distaccato, si potrà valutare quale sia la traiettoria dell'elemento.

Al fine dell'analisi delle eventuali conseguenze della rottura degli elementi rotanti, il rischio deve essere considerato tenendo conto di due fattori principali:

- la probabilità che un determinato evento si possa manifestare;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Ciò che s'intende analizzare con la presente, è il rischio che la caduta di un oggetto dall'alto possa avere conseguenze per l'incolumità delle persone.

La caduta di oggetti dall'alto può essere dovuta a diverse possibili cause:

- pezzi di ghiaccio formatisi sulla pala;
- rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per quanto riguarda il primo aspetto, l'eventuale gelificazione di elementi di rilevante dimensione, alle latitudini in cui insisterà il progetto può ritenersi probabile in quanto il mix di fattori quali temperature al di sotto dello zero per periodi molto prolungati ed elevata umidità relativa dell'aria possono considerarsi estremamente sporadici ma non irreali. È tuttavia corretto tenere presente

che, in assenza di vento, la posizione assunta dalle pale rende difficile la formazione di ghiaccio sugli organi rotanti.

Va precisato che tali temperature sono probabili esclusivamente nei mesi più freddi dell'anno Compresi tra dicembre e febbraio. Si ritiene pertanto utile eseguire uno studio sul tipo di danno che potrebbe essere provocato dall'eventuale distacco di elementi di modeste dimensioni, nello specifico sulla possibile gittata massima di tali elementi.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche. L'utilizzo di questi materiali limita sino quasi ad annullare la probabilità di distacco di singole parti meccaniche in rotazione (anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono di fatto unita in un unico pezzo, seppure gravemente danneggiato).

Statisticamente le maggiori cause di danno sono quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. L'impianto eolico viene realizzato al fine di trasformare l'energia del vento in energia elettrica, a tale scopo è fondamentale che l'efficienza delle macchine sia sempre garantita, proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con un parafulmine.

In conformità a quanto previsto dalla norma CEI contro il rischio fulminazione, la classe di protezione sarà quella che in termini probabilistici consentirà un livello di protezione elevato con la conseguente probabilità molto bassa, pari a circa il 2%, che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema.

Pertanto, possiamo sicuramente affermare che la probabilità che si produca un danno al sistema con l'ulteriore aggravante di successivi incidenti è molto bassa.

Ciò premesso ai fini della presente si formulerà comunque il calcolo per valutare la gittata massima in caso di rottura degli organi rotanti che, per quanto descritto, verrà valutata con riferimento alla rottura di una porzione di pala.

3 ANALISI TEORICA

Da un punto di vista teorico il calcolo della gittata massima, in caso di rottura di un elemento, segue il principio della balistica applicata al moto parabolico o moto del proiettile.

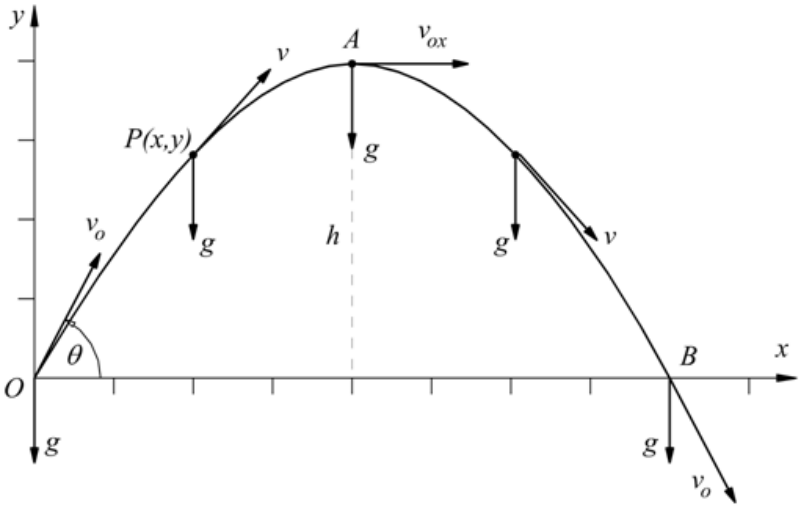


Figura 1. Rappresentazione grafica del moto parabolico

Con Tale considerazione di base hanno seguito tutte le successive valutazioni.

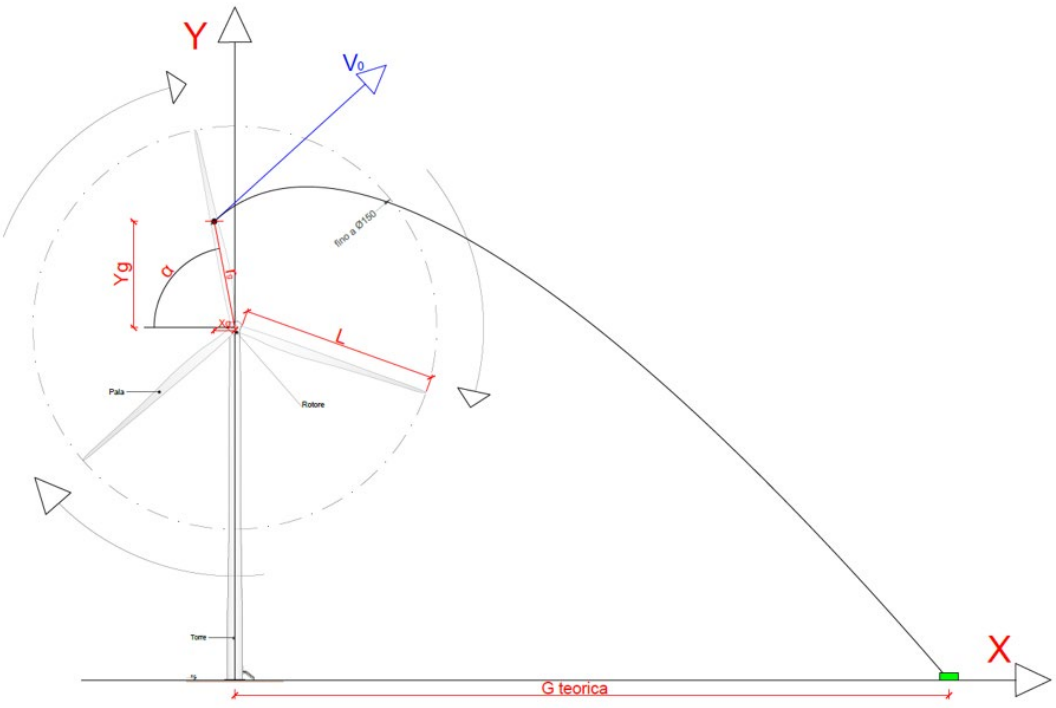


Figura 2. Applicazione teorica del moto del proiettile

La gittata massima di un frammento della pala, di una sua sezione distaccata o di elementi gelificati presenti su di essa, si verifica quando la traiettoria del distacco consente un'ottimale combinazione delle componenti orizzontale e verticale della velocità, assumendo che il moto del frammento sia assimilabile a quello di un giavellotto.

La gittata degli elementi sarà comunque dipendente da alcuni fattori:

- Forze di resistenza viscosa che si oppongono al moto;
- Portanza aerodinamica dell'elemento distaccato, che avendo un profilo aerodinamico ottimizzato, potrebbe favorirne il moto.

La prevalenza di uno piuttosto che dell'altro fattore è fortemente condizionata dalle caratteristiche del volo: rollio, imbardata e impennamento dell'elemento durante il volo.

Per semplificare i calcoli si specifica che l'azione della portanza sarà considerata nei calcoli schematizzandola in una riduzione percentuale di peso della parte distaccata.

Le forze di resistenza che agiscono sulla pala in realtà rendono minore il tempo di volo e quindi la gittata. Il moto reale è molto più complesso, in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala) che influenzano con una minore gittata il moto dell'elemento e quindi, non considerandoli si andrà a favore di sicurezza.

4 ELEMENTI DI ANALISI DELLA MASSIMA GITTATA

Di seguito si analizzeranno gli elementi determinanti per il calcolo della massima gittata che può avere un elemento rotante distaccato.

4.1 Traiettoria

La traiettoria iniziale dell'elemento distaccato è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco/rottura e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia agenti in quel momento.

Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico*, static & dinamic forces, static drag* e relativi momenti, queste agiranno sull'elemento influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

4.2 Tempo di volo

Per il calcolo della distanza percorsa dovrà valutarsi il tempo in cui l'elemento distaccato prosegue il suo volo, questo è determinato da alcuni fattori ed in particolare:

- Dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dall' elemento - immediatamente dopo il distacco - in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- Dalla posizione rispetto al suolo;
- Dall'accelerazione verticale;
- Dalle forze di attrito agenti sull'elemento stesso.

5 ELEMENTI DI DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA DISTANZA PERCORRIBILE

La massima distanza orizzontale percorribile dall'elemento distaccato, durante la fase di volo, è quindi determinata:

- Dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- Dalle forze di attrito che agiscono sull'elemento in volo;
- Dal tempo di volo influenzato anche dalla componente verticale della velocità.

Nel calcolo delle forze agenti si dovranno quindi tenere in considerazione due componenti quelle *in-plane e quelle out-plane*, infatti le componenti del moto, anche per come descritto precedentemente, saranno composte da elementi nel piano e perpendicolari al piano.

La somma vettoriale di queste due componenti permette di ricavare la distanza massima, teorica, percorsa in volo dall'elemento distaccato.

6 STIMA DELLA DISTANZA MASSIMA PERCORRIBILE

Il caso in esame è quello per il quale risulta coerente e fattibile l'esame della distanza massima percorribile. A livello costruttivo esiste infatti un punto di discontinuità strutturale nell'attacco bullonato che collega la pala al mozzo per il quale esiste infatti un'ipotesi, seppur remota, di cedimento dell'attacco trattandosi dell'elemento di congiunzione delle due componenti.

Di contro, il calcolo di gittata nel caso di distacco di frammenti e porzioni di guscio, risulta problematico e privo di basi computazionali, in quanto lo stabilire le dimensioni del pezzo distaccato è del tutto aleatorio e non dipendente da una causa specifica come quelle collegabili ad una discontinuità o un difetto di progettazione di realizzazione della pala.

In questo caso si ritiene quindi utile eseguire la verifica con il calcolo della gittata massima scegliendo quindi, tra le varie combinazioni possibili, quella che restituisce il valore massimo, nonostante la

geometria degli elementi stessi porterebbe a considerare che le distanze percorse siano inferiori e la possibilità che tale evento si manifesti sia comunque nulla.

I dati e le considerazioni alla base del calcolo sono:

- Aerogeneratori Vestas V150 [4,5 MW];
- Rottura di porzioni dell'elemento pala;
- Velocità di rotazione massima 12 giri/minuto;
- Attrito dell'aria considerato nullo;
- Punto di rottura calcolato da 0° a 180° considerati dal piano orizzontale sull'asse del rotore.

L'aerogeneratore preso in considerazione ha altezza massima del mozzo di 105 metri, con pale di lunghezza pari a circa 73,66 m.

La formula della massima gittata applicata al caso specifico e con le modalità descritte nei paragrafi precedenti risulta essere la seguente:

$$\mathbf{G = \frac{V_{x0}\left(V_{y0} + \sqrt{V_{yo}^{\,2} + 2 * g * HG}\right)}{g} - X_g}$$

Equazione 1. formula della gittata massima

di cui le componenti sono:

α - l'angolo di rottura dell'elemento considerato rispetto all'orizzonte:

$H_G = H_{torre} + Y_g$;

$Y_g = r_g \text{ sen } \alpha$;

$r_g = \frac{D}{2} - L + \frac{L}{3}$ posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo;

$X_g = r_g \cos \alpha$ - posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre;

$v_{x0} = v_0 \cos (90 - \alpha) = v_0 \text{ sen } \alpha$;

$v_{y0} = v_0 \text{ sen } (90 - \alpha) = v_0 \cos \alpha$;

$v_0 = \omega r_g = (2\pi n r_g)/60$;

n = Numero di giro al minuto del rotore;

L = 73,66 m Lunghezza della pala in metri;

H_{torre} = 105 m Altezza del mozzo in metri;

G = Gittata teorica.

L'applicazione della formula precedentemente esposta, in un foglio di calcolo, permette di sviluppare la seguente tabella che mette in chiaro tutti parametri utilizzati per il calcolo della gittata massima e le distanze calcolate per valori di α che vanno da 0 a 180°.

Il valore di gittata massima sarà in fine ricercato nella seguente tabella lungo la colonna "Gittata teorica".

Tabella 2. Identificazione della gittata teorica

Angolo α	n	L	Htorre	v0	vx0	vy0	Hg	D	rg	g	Xg	Gittata teorica
0	12	73,66	105,00	32,54	0,00	32,54	105,00	150,00	25,89	9,81	25,89	-25,89
1	12	73,66	105,00	32,54	0,57	32,53	105,45	150,00	25,89	9,81	25,89	-20,77
2	12	73,66	105,00	32,54	1,14	32,52	105,90	150,00	25,89	9,81	25,88	-15,63
3	12	73,66	105,00	32,54	1,70	32,49	106,36	150,00	25,89	9,81	25,86	-10,49
4	12	73,66	105,00	32,54	2,27	32,46	106,81	150,00	25,89	9,81	25,83	-5,34
5	12	73,66	105,00	32,54	2,84	32,41	107,26	150,00	25,89	9,81	25,79	-0,19
6	12	73,66	105,00	32,54	3,40	32,36	107,71	150,00	25,89	9,81	25,75	4,96
7	12	73,66	105,00	32,54	3,97	32,30	108,16	150,00	25,89	9,81	25,70	10,10
8	12	73,66	105,00	32,54	4,53	32,22	108,60	150,00	25,89	9,81	25,64	15,22
9	12	73,66	105,00	32,54	5,09	32,14	109,05	150,00	25,89	9,81	25,57	20,33
10	12	73,66	105,00	32,54	5,65	32,04	109,50	150,00	25,89	9,81	25,50	25,41
11	12	73,66	105,00	32,54	6,21	31,94	109,94	150,00	25,89	9,81	25,42	30,47
12	12	73,66	105,00	32,54	6,77	31,83	110,38	150,00	25,89	9,81	25,33	35,50
13	12	73,66	105,00	32,54	7,32	31,70	110,82	150,00	25,89	9,81	25,23	40,50
14	12	73,66	105,00	32,54	7,87	31,57	111,26	150,00	25,89	9,81	25,12	45,46
15	12	73,66	105,00	32,54	8,42	31,43	111,70	150,00	25,89	9,81	25,01	50,38
16	12	73,66	105,00	32,54	8,97	31,28	112,14	150,00	25,89	9,81	24,89	55,25
17	12	73,66	105,00	32,54	9,51	31,12	112,57	150,00	25,89	9,81	24,76	60,07
18	12	73,66	105,00	32,54	10,05	30,95	113,00	150,00	25,89	9,81	24,63	64,84
19	12	73,66	105,00	32,54	10,59	30,77	113,43	150,00	25,89	9,81	24,48	69,56
20	12	73,66	105,00	32,54	11,13	30,58	113,86	150,00	25,89	9,81	24,33	74,21
21	12	73,66	105,00	32,54	11,66	30,38	114,28	150,00	25,89	9,81	24,17	78,81
22	12	73,66	105,00	32,54	12,19	30,17	114,70	150,00	25,89	9,81	24,01	83,33
23	12	73,66	105,00	32,54	12,71	29,95	115,12	150,00	25,89	9,81	23,83	87,79
24	12	73,66	105,00	32,54	13,23	29,73	115,53	150,00	25,89	9,81	23,65	92,17
25	12	73,66	105,00	32,54	13,75	29,49	115,94	150,00	25,89	9,81	23,47	96,48

Angolo α	n	L	Htorre	v0	vx0	vy0	Hg	D	rg	g	Xg	Gittata teorica
26	12	73,66	105,00	32,54	14,26	29,25	116,35	150,00	25,89	9,81	23,27	100,70
27	12	73,66	105,00	32,54	14,77	28,99	116,76	150,00	25,89	9,81	23,07	104,85
28	12	73,66	105,00	32,54	15,28	28,73	117,16	150,00	25,89	9,81	22,86	108,91
29	12	73,66	105,00	32,54	15,77	28,46	117,55	150,00	25,89	9,81	22,65	112,88
30	12	73,66	105,00	32,54	16,27	28,18	117,95	150,00	25,89	9,81	22,42	116,77
31	12	73,66	105,00	32,54	16,76	27,89	118,34	150,00	25,89	9,81	22,19	120,56
32	12	73,66	105,00	32,54	17,24	27,59	118,72	150,00	25,89	9,81	21,96	124,26
33	12	73,66	105,00	32,54	17,72	27,29	119,10	150,00	25,89	9,81	21,72	127,86
34	12	73,66	105,00	32,54	18,20	26,98	119,48	150,00	25,89	9,81	21,47	131,37
35	12	73,66	105,00	32,54	18,66	26,65	119,85	150,00	25,89	9,81	21,21	134,77
36	12	73,66	105,00	32,54	19,13	26,32	120,22	150,00	25,89	9,81	20,95	138,07
37	12	73,66	105,00	32,54	19,58	25,99	120,58	150,00	25,89	9,81	20,68	141,27
38	12	73,66	105,00	32,54	20,03	25,64	120,94	150,00	25,89	9,81	20,40	144,37
39	12	73,66	105,00	32,54	20,48	25,29	121,30	150,00	25,89	9,81	20,12	147,36
40	12	73,66	105,00	32,54	20,92	24,93	121,64	150,00	25,89	9,81	19,84	150,24
41	12	73,66	105,00	32,54	21,35	24,56	121,99	150,00	25,89	9,81	19,54	153,01
42	12	73,66	105,00	32,54	21,77	24,18	122,33	150,00	25,89	9,81	19,24	155,68
43	12	73,66	105,00	32,54	22,19	23,80	122,66	150,00	25,89	9,81	18,94	158,23
44	12	73,66	105,00	32,54	22,60	23,41	122,99	150,00	25,89	9,81	18,63	160,68
45	12	73,66	105,00	32,54	23,01	23,01	123,31	150,00	25,89	9,81	18,31	163,01
46	12	73,66	105,00	32,54	23,41	22,60	123,63	150,00	25,89	9,81	17,99	165,24
47	12	73,66	105,00	32,54	23,80	22,19	123,94	150,00	25,89	9,81	17,66	167,35
48	12	73,66	105,00	32,54	24,18	21,77	124,24	150,00	25,89	9,81	17,33	169,35
49	12	73,66	105,00	32,54	24,56	21,35	124,54	150,00	25,89	9,81	16,99	171,24
50	12	73,66	105,00	32,54	24,93	20,92	124,84	150,00	25,89	9,81	16,64	173,02
51	12	73,66	105,00	32,54	25,29	20,48	125,12	150,00	25,89	9,81	16,30	174,68
52	12	73,66	105,00	32,54	25,64	20,03	125,40	150,00	25,89	9,81	15,94	176,24
53	12	73,66	105,00	32,54	25,99	19,58	125,68	150,00	25,89	9,81	15,58	177,69
54	12	73,66	105,00	32,54	26,32	19,13	125,95	150,00	25,89	9,81	15,22	179,03
55	12	73,66	105,00	32,54	26,65	18,66	126,21	150,00	25,89	9,81	14,85	180,26
56	12	73,66	105,00	32,54	26,98	18,20	126,47	150,00	25,89	9,81	14,48	181,38
57	12	73,66	105,00	32,54	27,29	17,72	126,72	150,00	25,89	9,81	14,10	182,40
58	12	73,66	105,00	32,54	27,59	17,24	126,96	150,00	25,89	9,81	13,72	183,31
59	12	73,66	105,00	32,54	27,89	16,76	127,19	150,00	25,89	9,81	13,34	184,12
60	12	73,66	105,00	32,54	28,18	16,27	127,42	150,00	25,89	9,81	12,95	184,83
61	12	73,66	105,00	32,54	28,46	15,77	127,65	150,00	25,89	9,81	12,55	185,43
62	12	73,66	105,00	32,54	28,73	15,28	127,86	150,00	25,89	9,81	12,16	185,94
63	12	73,66	105,00	32,54	28,99	14,77	128,07	150,00	25,89	9,81	11,76	186,34
64	12	73,66	105,00	32,54	29,25	14,26	128,27	150,00	25,89	9,81	11,35	186,66
65	12	73,66	105,00	32,54	29,49	13,75	128,47	150,00	25,89	9,81	10,94	186,88

Angolo α	n	L	Htorre	v0	vx0	vy0	Hg	D	rg	g	Xg	Gittata teorica
66	12	73,66	105,00	32,54	29,73	13,23	128,65	150,00	25,89	9,81	10,53	187,00
67	12	73,66	105,00	32,54	29,95	12,71	128,83	150,00	25,89	9,81	10,12	187,04
68	12	73,66	105,00	32,54	30,17	12,19	129,01	150,00	25,89	9,81	9,70	186,98
69	12	73,66	105,00	32,54	30,38	11,66	129,17	150,00	25,89	9,81	9,28	186,85
70	12	73,66	105,00	32,54	30,58	11,13	129,33	150,00	25,89	9,81	8,86	186,62
71	12	73,66	105,00	32,54	30,77	10,59	129,48	150,00	25,89	9,81	8,43	186,32
72	12	73,66	105,00	32,54	30,95	10,05	129,63	150,00	25,89	9,81	8,00	185,93
73	12	73,66	105,00	32,54	31,12	9,51	129,76	150,00	25,89	9,81	7,57	185,47
74	12	73,66	105,00	32,54	31,28	8,97	129,89	150,00	25,89	9,81	7,14	184,94
75	12	73,66	105,00	32,54	31,43	8,42	130,01	150,00	25,89	9,81	6,70	184,33
76	12	73,66	105,00	32,54	31,57	7,87	130,12	150,00	25,89	9,81	6,26	183,65
77	12	73,66	105,00	32,54	31,70	7,32	130,23	150,00	25,89	9,81	5,82	182,90
78	12	73,66	105,00	32,54	31,83	6,77	130,33	150,00	25,89	9,81	5,38	182,09
79	12	73,66	105,00	32,54	31,94	6,21	130,42	150,00	25,89	9,81	4,94	181,21
80	12	73,66	105,00	32,54	32,04	5,65	130,50	150,00	25,89	9,81	4,50	180,27
81	12	73,66	105,00	32,54	32,14	5,09	130,57	150,00	25,89	9,81	4,05	179,28
82	12	73,66	105,00	32,54	32,22	4,53	130,64	150,00	25,89	9,81	3,60	178,23
83	12	73,66	105,00	32,54	32,30	3,97	130,70	150,00	25,89	9,81	3,16	177,12
84	12	73,66	105,00	32,54	32,36	3,40	130,75	150,00	25,89	9,81	2,71	175,97
85	12	73,66	105,00	32,54	32,41	2,84	130,79	150,00	25,89	9,81	2,26	174,76
86	12	73,66	105,00	32,54	32,46	2,27	130,83	150,00	25,89	9,81	1,81	173,51
87	12	73,66	105,00	32,54	32,49	1,70	130,86	150,00	25,89	9,81	1,36	172,22
88	12	73,66	105,00	32,54	32,52	1,14	130,88	150,00	25,89	9,81	0,90	170,88
89	12	73,66	105,00	32,54	32,53	0,57	130,89	150,00	25,89	9,81	0,45	169,50
90	12	73,66	105,00	32,54	32,54	0,00	130,89	150,00	25,89	9,81	0,00	168,09

La gittata massima si verificherebbe a diverse angolazioni rispetto alla turbina eolica (WTG), corrispondenti ai quadranti I e II di un piano cartesiano:

- Nel I quadrante (a sinistra della WTG): la gittata massima si avrebbe a 67 gradi.
- Nel II quadrante (a destra della WTG): la gittata massima si raggiungerebbe a 113 gradi.

In entrambi i casi, la gittata diminuirebbe avvicinandosi sia all'asse orizzontale che a quello verticale del piano considerato.



Figura 3. identificazione dei gradi di rottura dell'elemento pala a sx e dx

La stima è ovviamente effettuata in condizioni di grande sicurezza in quanto:

- non tiene conto della resistenza dell'aria che rallenta il moto sull'asse orizzontale (è stato modellato come moto rettilineo uniforme);
- non tiene conto della enorme dissipazione di energia che, comunque, si avrebbe al momento del distacco per vincere la resistenza del vincolo della pala all'aerogeneratore: infatti quand'anche si consideri il caso di distacco della pala dalla navicella, è evidente che il

dispendio di energia cinetica per rompere il vincolo con l'aerogeneratore non può essere nullo;

- non tiene conto della velocità e la direzione del vento al momento del distacco.

7 DATI SPERIMENTALI E CONCLUSIONE

Ciò che si verifica in realtà in caso di rottura di parti della pala, come confermato dagli studi di settore e come rinvenibile nella casistica di cui si abbia notizia su parchi eolici esistenti, è un moto di rotazione complesso e la distanza di volo è sempre ben al di sotto dei risultati ottenuti attraverso i calcoli matematici.

Le parti che subiscono il distaccamento a causa di eventi esterni come la fulminazione sono state rinvenute a non più di 40-50 m dalla base della torre eolica.

Sebbene vi siano innumerevoli variabili che possono concorrere a determinare la gittata massima, si può pertanto confermare che la distanza massima a cui potrebbe essere possibile rinvenire l'intera ala o porzioni della stessa in caso di distacco è di **187,04** m.

Tenuto conto di tali distanze percorribili dall'elemento distaccato (pala o porzioni di essa), ed analizzato lo stato di fatto dei luoghi circostanti alle singole WTG (assenza di abitazioni entro il raggio di possibile impatto dell'elemento pala o di una porzione della stessa) il risultato del calcolo della possibile gittata permette di poter affermare l'assenza di minacce per l'incolumità pubblica.

La seguente figura permette dimettere in chiaro quanto precedentemente esposto.



Figura 4. Postazioni machina, in rosso le aree sensibili alla gittata massima.

Palermo 23/09/2025

Ing. Girolamo Gorgone