



REGIONE SICILIA
PROVINCIA DI TRAPANI
COMUNE DI CALATAFIMI SEGESTA
COMUNE DI SANTA NINFA
COMUNE DI GIBELLINA

OGGETTO

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO EOLICO COMPOSTO DA 8 AEROGENERATORI DA 6 MW CIASCUNO PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 48 MW DENOMINATO "BORGO EREDITA" SITO NEL COMUNE DI CALATAFIMI SEGESTA (TP) IN LOCALITÀ BORGO EREDITA E DELLE OPERE CONNESSE E INFRASTRUTTURE INDISPENSABILI ALL'ESERCIZIO DELLO STESSO SITE NEI COMUNI DI SANTA NINFA (TP) E GIBELLINA (TP)

PROGETTO DEFINITIVO

PROPONENTE



TITOLO

RELAZIONE DI GITTATA MASSIMA

PROGETTISTA

Dott. Ing. Girolamo Gorgone

Collaboratori

Ing. Giocchino Ruisi
All. Arch. Flavia Termini
Ing. Giuseppina Brucato
Arch. Eugenio Azzarello

Ing. Francesco Lipari
Dott. Haritiana Ratsimba
Dott. Agr. e For. Michele Virzi
Dott. Martina Affronti

Dott. Valeria Croce
Dott. Irene Romano
Barbara Gorgone

CODICE ELABORATO

ERIN-BE_R_18_A_D

SCALA

n°.Rev.	DESCRIZIONE REVISIONE	DATA	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO

Rif. PROGETTO

N. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

NOME FILE DI STAMPA

SCALA DI STAMPA DA FILE

Sommario

Introduzione	2
1 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI	3
2 ANALISI TEORICA	4
3 ELEMENTI DI ANALISI DELLA MASSIMA GITTATA	6
3.1 Traiettoria	6
3.2 Tempo di volo	6
4 ELEMENTI DI DETERMINAZIONE DELLA MASSIMA DISTANZA PERCORRIBILE.....	7
5 STIMA DELLA DISTANZA MASSIMA PERCORRIBILE	7
6 DATI SPERIMENTALI E CONCLUSIONE	13

Introduzione

Il presente documento costituisce la relazione relativa all'analisi delle conseguenze dell'eventuale rottura degli organi rotanti degli aerogeneratori del Progetto definitivo per la realizzazione di un impianto di generazione di energia da fonte, costituito da 8 aerogeneratori. L'aerogeneratore preso a riferimento in questa fase di progettazione è del produttore VESTAS, con altezza complessiva massima di 155 metri, altezza al mozzo compresa tra 105 e 114 metri e diametro del rotore massimo di 180 metri. Ogni aerogeneratore è servito da un piazzale di circa 1200 m² accessibile a mezzo di piste in misto stabilizzato di cava ampie tra i 4 e i 5 metri. Non si prevede la realizzazione di altre opere fuori terra oltre agli aerogeneratori ed alla SSE utente di trasformazione, dal momento che tutti i macchinari elettrici sono collocati all'interno delle navicelle mentre i cavidotti di connessione saranno interrati.

La potenza complessiva d'impianto sarà pari a 48 MW. L'impianto in progetto ricade nel comune di Calatafimi Segesta (TP), mentre le opere di connessione alla Rete Elettrica Nazionale interessano anche i Comuni di Gibellina e Santa Ninfa sempre nella provincia di Trapani

La società realizzatrice dell'impianto è Edison Rinnovabili S.p.A. In circa 130 anni di storia aziendale, Edison ha saputo consolidarsi in vari settori ampliando le attività in cui è presente, in particolare quello della produzione, distribuzione e vendita di energia elettrica; i parchi di produzione energetica di Edison sono altamente sostenibili, flessibili ed efficienti e sono composti da impianti termoelettrici a ciclo combinato a gas (CCGT), impianti idroelettrici, eolici, solari e a biomasse.

Oggi Edison è il secondo operatore in Italia nel settore eolico (con una capacità installata soprattutto nel Mezzogiorno) configurandosi come un operatore integrato lungo la filiera eolica con attività che vanno dalla produzione alla gestione e manutenzione degli impianti fino alla vendita dell'energia.

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 8 del D.P.R. 495/92.

All'interno dell'elaborato saranno quindi valutati gli effetti che avrebbe la rottura accidentale degli organi rotanti degli aerogeneratori indicati nella seguente tabella:

Produttore	Identificativo	Coordinate
		Latitudine - Longitudine
Vestas	BE01	37°51'18.73" - 12°53'31.51"
Vestas	BE02	37°51'19.72" - 12°53'48.97"
Vestas	BE03	37°51'05.49" - 12°54'04.99"
Vestas	BE04	37°50'51.28" - 12°54'10.08"
Vestas	BE05	37°50'10.72" - 12°53'53.79"

Produttore	Identificativo	Coordinate
		Latitudine - Longitudine
Vestas	BE06	37°50'22.10" - 12°54'37.86"
Vestas	BE07	37°50'02.46" - 12°55'03.56"
Vestas	BE08	37°50'38.64" - 12°55'19.76"

Tabella 1 - identificativi, coordinate geografiche ed identificativi catastali delle WTG

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.

1 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 oltre dispone tutta la componentistica elettromeccanica che serve per la conversione dell'energia eolica 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 formati sulla pala;
- Rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Per quanto riguarda il primo aspetto, l'eventuale gelificazione di elementi di rilevante dimensione, questa richiede temperature ben al di sotto dello zero e per periodi molto prolungati. Precisando che il progetto prevede l'installazione dell'impianto eolico ad una latitudine dove tale evento può considerarsi praticamente inesistente ed ininfluenza (tali temperature sono improbabili in qualsiasi mese dell'anno) si ritiene praticamente nulla la possibilità che questa si manifesti. Si ritiene pertanto utile eseguire uno studio sul tipo di danno che potrebbe essere provocato dalla rottura degli elementi rotanti e nello specifico sulla possibile gittata massima di tali elementi.

Le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o resine 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 degli organi rotanti.

2 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 dei proiettili.

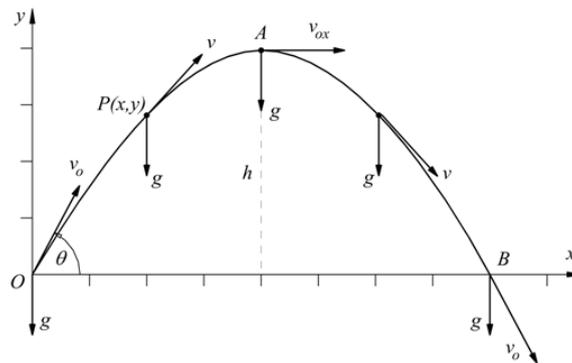


Figura 1 - Rappresentazione grafica dal moto parabolico

Con questa considerazione base hanno seguito tutte le successive valutazioni.

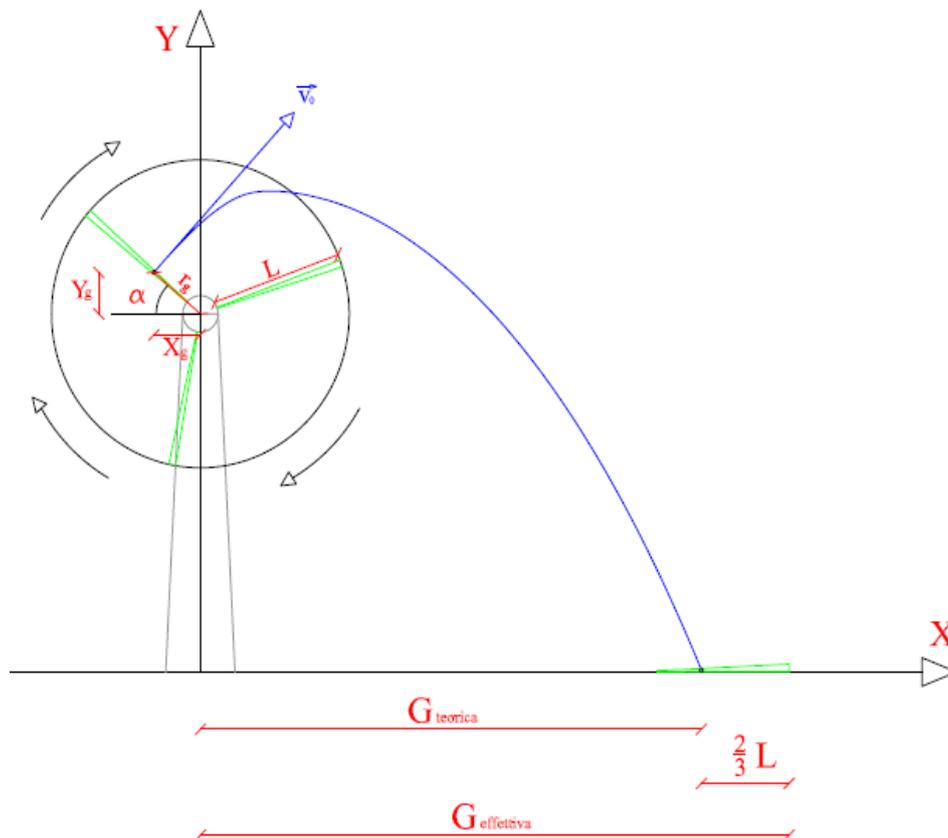


Figura 2 - Applicazione teorica moto del proiettile - su WTG

La gittata maggiore della pala, o di una sezione distaccata della stessa, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza di angoli di rottura variabili, compresi tra 180 e 90 gradi (II° quadrante di un ipotetico piano cartesiano) e da 90 a 0 gradi (I° quadrante di un ipotetico piano cartesiano) con componente verticale e orizzontale della velocità e di moto a "giavellotto" del frammento.

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.

3 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.

3.1 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 & dynamic forces*, *static drag* e relativi momenti, queste agiranno sull'elemento influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

3.2 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.

4 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 in 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.

5 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 i seguenti:

- Aerogeneratori Vestas V150-6.0;
- Rottura di tutto l'elemento pala;
- Velocità di rotazione max 12,6 RPM;
- Attrito dell'aria considerato nullo;
- Punto di rottura calcolato da 180° a 0° considerati dal piano orizzontale sull'asse del rotore.

Per completezza si riportano di seguito anche le caratteristiche dell'aerogeneratore impiegato nella presente simulazione che è il modello "Vestas V150-6.0 MW" rappresentato nelle figure che seguono e caratterizzato dai dati riportati nella successiva tabella:

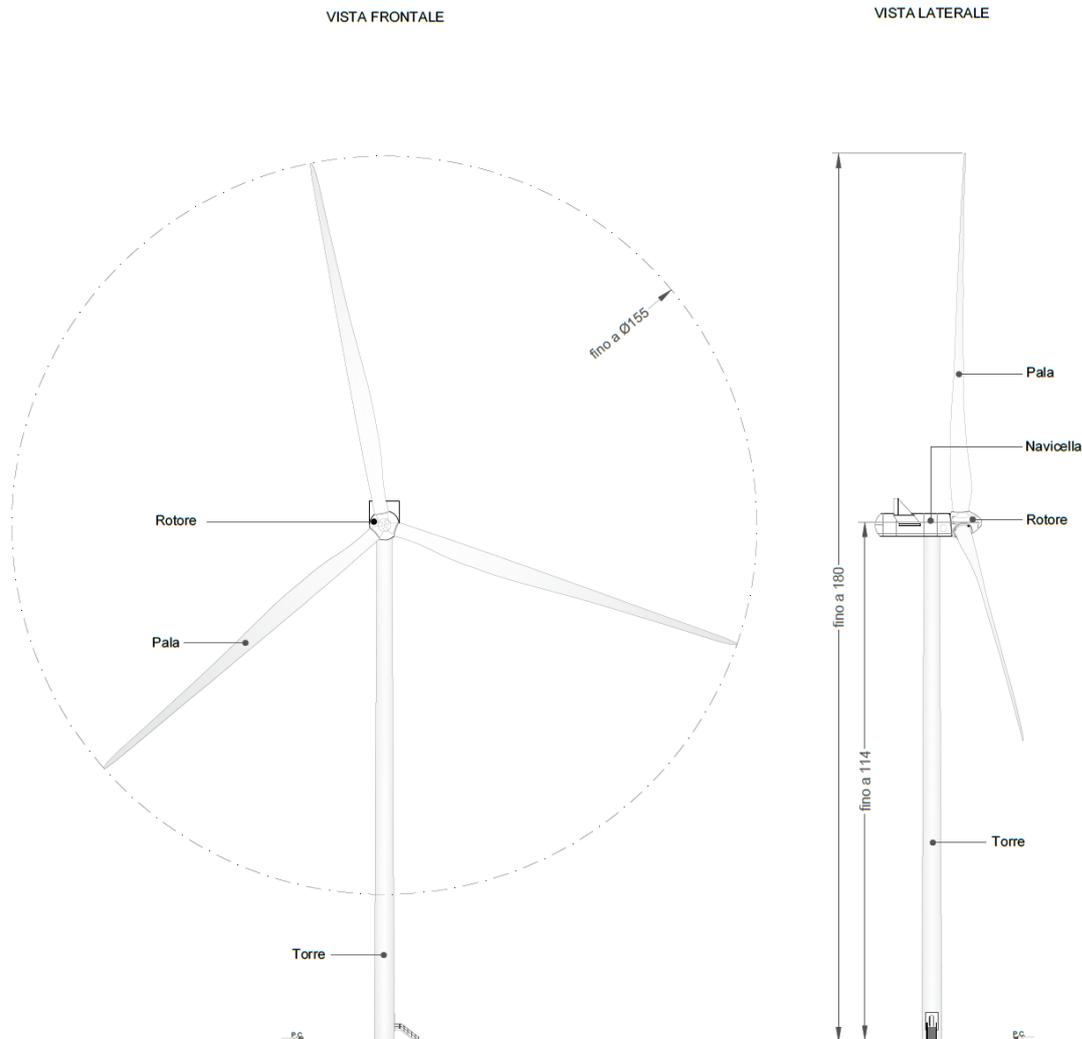


Figura 3 - Vista frontale (sx), di profilo (dx) dell'aerogeneratore.

VISTA DALL'ALTO

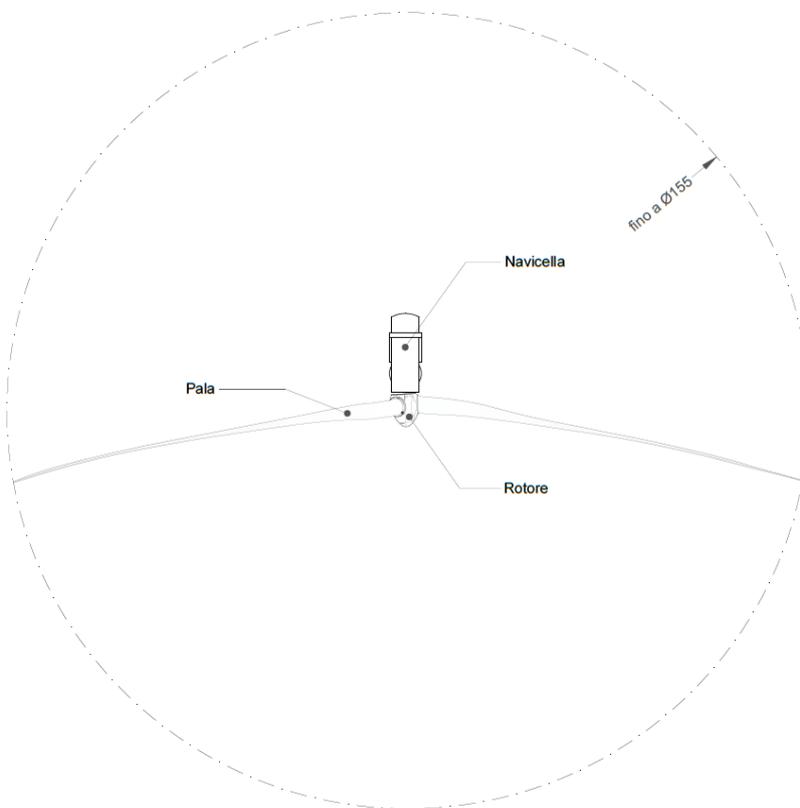


Figura 4 - Vista dall'alto dell'aerogeneratore.

Dati costruttivi e di esercizio	
Vestas V150-6.0	
Potenza Nominale: 6.00 MW	
Rotore	
Tipo	3 pale
Diametro	150m
Area Spazzata	17.671 m ²
Tilt	6°
Pale	
Lunghezza	73,65 m
Larghezza MAX	4,2 m
Materiale	Fibra di vetro/Carbonio/Plastica
Colore	Bianco/Grigio
Torre	
Tipo	Tubolare

Dati costruttivi e di esercizio	
Vestas V150-6.0	
Potenza Nominale: 6.00 MW	
Altezza hub	105
Colore	Bianco/Grigio
Dati operativi	
Cut-in Wind Speed	3 m/s
Cut-out Wind Speed	25 m/s
RPM Max	12,6

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

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

di cui le componenti sono:

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

$$H_G = H_{torre} + Y_g ;$$

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

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

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

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

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

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

n = Numero di giro al minuto del rotore;

L = 75 m Lunghezza della pala in metri;

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

$G_{eff} = G + L_g$ Gittata effettiva.

L'equazione precedentemente esposta, applicata in un foglio di calcolo permette di sviluppare la tabella seguente 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 in tabella nella colonna Gittata effettiva.

Angolo α	n	L	H _{Torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
0	12,60	73,65	105,00	34,17	0,00	34,17	105,00	150	25,90	9,81	-25,90	25,90	49,10	23,20
1	12,60	73,65	105,00	34,17	0,60	34,17	105,45	150	25,90	9,81	-20,36	25,90	49,10	28,74
2	12,60	73,65	105,00	34,17	1,19	34,15	105,90	150	25,90	9,81	-14,81	25,88	49,10	34,29
3	12,60	73,65	105,00	34,17	1,79	34,13	106,36	150	25,90	9,81	-9,25	25,86	49,10	39,85
4	12,60	73,65	105,00	34,17	2,38	34,09	106,81	150	25,90	9,81	-3,68	25,84	49,10	45,42
5	12,60	73,65	105,00	34,17	2,98	34,04	107,26	150	25,90	9,81	1,88	25,80	49,10	50,98
6	12,60	73,65	105,00	34,17	3,57	33,99	107,71	150	25,90	9,81	7,44	25,76	49,10	56,54
7	12,60	73,65	105,00	34,17	4,16	33,92	108,16	150	25,90	9,81	12,98	25,71	49,10	62,08
8	12,60	73,65	105,00	34,17	4,76	33,84	108,60	150	25,90	9,81	18,51	25,65	49,10	67,61
9	12,60	73,65	105,00	34,17	5,35	33,75	109,05	150	25,90	9,81	24,02	25,58	49,10	73,12
10	12,60	73,65	105,00	34,17	5,93	33,66	109,50	150	25,90	9,81	29,50	25,51	49,10	78,60
11	12,60	73,65	105,00	34,17	6,52	33,55	109,94	150	25,90	9,81	34,96	25,42	49,10	84,06
12	12,60	73,65	105,00	34,17	7,11	33,43	110,38	150	25,90	9,81	40,38	25,33	49,10	89,48
13	12,60	73,65	105,00	34,17	7,69	33,30	110,83	150	25,90	9,81	45,76	25,24	49,10	94,86
14	12,60	73,65	105,00	34,17	8,27	33,16	111,27	150	25,90	9,81	51,10	25,13	49,10	100,20
15	12,60	73,65	105,00	34,17	8,84	33,01	111,70	150	25,90	9,81	56,39	25,02	49,10	105,49
16	12,60	73,65	105,00	34,17	9,42	32,85	112,14	150	25,90	9,81	61,63	24,90	49,10	110,73
17	12,60	73,65	105,00	34,17	9,99	32,68	112,57	150	25,90	9,81	66,82	24,77	49,10	115,92
18	12,60	73,65	105,00	34,17	10,56	32,50	113,00	150	25,90	9,81	71,95	24,63	49,10	121,05
19	12,60	73,65	105,00	34,17	11,13	32,31	113,43	150	25,90	9,81	77,01	24,49	49,10	126,11
20	12,60	73,65	105,00	34,17	11,69	32,11	113,86	150	25,90	9,81	82,01	24,34	49,10	131,11
21	12,60	73,65	105,00	34,17	12,25	31,90	114,28	150	25,90	9,81	86,93	24,18	49,10	136,03
22	12,60	73,65	105,00	34,17	12,80	31,69	114,70	150	25,90	9,81	91,78	24,01	49,10	140,88
23	12,60	73,65	105,00	34,17	13,35	31,46	115,12	150	25,90	9,81	96,55	23,84	49,10	145,65
24	12,60	73,65	105,00	34,17	13,90	31,22	115,53	150	25,90	9,81	101,25	23,66	49,10	150,35
25	12,60	73,65	105,00	34,17	14,44	30,97	115,95	150	25,90	9,81	105,85	23,47	49,10	154,95
26	12,60	73,65	105,00	34,17	14,98	30,72	116,35	150	25,90	9,81	110,37	23,28	49,10	159,47
27	12,60	73,65	105,00	34,17	15,51	30,45	116,76	150	25,90	9,81	114,80	23,08	49,10	163,90
28	12,60	73,65	105,00	34,17	16,04	30,17	117,16	150	25,90	9,81	119,13	22,87	49,10	168,23
29	12,60	73,65	105,00	34,17	16,57	29,89	117,56	150	25,90	9,81	123,36	22,65	49,10	172,46
30	12,60	73,65	105,00	34,17	17,09	29,60	117,95	150	25,90	9,81	127,50	22,43	49,10	176,60
31	12,60	73,65	105,00	34,17	17,60	29,29	118,34	150	25,90	9,81	131,53	22,20	49,10	180,63
32	12,60	73,65	105,00	34,17	18,11	28,98	118,72	150	25,90	9,81	135,46	21,96	49,10	184,56
33	12,60	73,65	105,00	34,17	18,61	28,66	119,11	150	25,90	9,81	139,28	21,72	49,10	188,38

Progetto per la realizzazione di un impianto eolico composto da 8 aerogeneratori da 6 MW ciascuno per una potenza complessiva di 48 MW denominato "Borgo Eredita" sito nel Comune di Calatafimi Segesta (TP) in località Borgo Eredita e delle opere connesse e infrastrutture indispensabili all'esercizio dello stesso site nei Comuni di Santa Ninfa (TP) e Gibellina (TP).

Angolo α	n	L	H _{torre}	V ₀	V _{x0}	V _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
34	12,60	73,65	105,00	34,17	19,11	28,33	119,48	150	25,90	9,81	143,00	21,47	49,10	192,10
35	12,60	73,65	105,00	34,17	19,60	27,99	119,86	150	25,90	9,81	146,60	21,22	49,10	195,70
36	12,60	73,65	105,00	34,17	20,09	27,65	120,22	150	25,90	9,81	150,09	20,95	49,10	199,19
37	12,60	73,65	105,00	34,17	20,57	27,29	120,59	150	25,90	9,81	153,47	20,68	49,10	202,57
38	12,60	73,65	105,00	34,17	21,04	26,93	120,95	150	25,90	9,81	156,73	20,41	49,10	205,83
39	12,60	73,65	105,00	34,17	21,51	26,56	121,30	150	25,90	9,81	159,87	20,13	49,10	208,97
40	12,60	73,65	105,00	34,17	21,97	26,18	121,65	150	25,90	9,81	162,89	19,84	49,10	211,99
41	12,60	73,65	105,00	34,17	22,42	25,79	121,99	150	25,90	9,81	165,80	19,55	49,10	214,90
42	12,60	73,65	105,00	34,17	22,87	25,40	122,33	150	25,90	9,81	168,58	19,25	49,10	217,68
43	12,60	73,65	105,00	34,17	23,31	24,99	122,66	150	25,90	9,81	171,24	18,94	49,10	220,34
44	12,60	73,65	105,00	34,17	23,74	24,58	122,99	150	25,90	9,81	173,79	18,63	49,10	222,89
45	12,60	73,65	105,00	34,17	24,16	24,16	123,31	150	25,90	9,81	176,21	18,31	49,10	225,31
46	12,60	73,65	105,00	34,17	24,58	23,74	123,63	150	25,90	9,81	178,50	17,99	49,10	227,60
47	12,60	73,65	105,00	34,17	24,99	23,31	123,94	150	25,90	9,81	180,68	17,66	49,10	229,78
48	12,60	73,65	105,00	34,17	25,40	22,87	124,25	150	25,90	9,81	182,73	17,33	49,10	231,83
49	12,60	73,65	105,00	34,17	25,79	22,42	124,55	150	25,90	9,81	184,66	16,99	49,10	233,76
50	12,60	73,65	105,00	34,17	26,18	21,97	124,84	150	25,90	9,81	186,47	16,65	49,10	235,57
51	12,60	73,65	105,00	34,17	26,56	21,51	125,13	150	25,90	9,81	188,16	16,30	49,10	237,26
52	12,60	73,65	105,00	34,17	26,93	21,04	125,41	150	25,90	9,81	189,72	15,95	49,10	238,82
53	12,60	73,65	105,00	34,17	27,29	20,57	125,68	150	25,90	9,81	191,17	15,59	49,10	240,27
54	12,60	73,65	105,00	34,17	27,65	20,09	125,95	150	25,90	9,81	192,49	15,22	49,10	241,59
55	12,60	73,65	105,00	34,17	27,99	19,60	126,22	150	25,90	9,81	193,70	14,86	49,10	242,80
56	12,60	73,65	105,00	34,17	28,33	19,11	126,47	150	25,90	9,81	194,79	14,48	49,10	243,89
57	12,60	73,65	105,00	34,17	28,66	18,61	126,72	150	25,90	9,81	195,77	14,11	49,10	244,87
58	12,60	73,65	105,00	34,17	28,98	18,11	126,96	150	25,90	9,81	196,63	13,72	49,10	245,73
59	12,60	73,65	105,00	34,17	29,29	17,60	127,20	150	25,90	9,81	197,38	13,34	49,10	246,48
60	12,60	73,65	105,00	34,17	29,60	17,09	127,43	150	25,90	9,81	198,02	12,95	49,10	247,12
61	12,60	73,65	105,00	34,17	29,89	16,57	127,65	150	25,90	9,81	198,54	12,56	49,10	247,64
62	12,60	73,65	105,00	34,17	30,17	16,04	127,87	150	25,90	9,81	198,96	12,16	49,10	248,06
63	12,60	73,65	105,00	34,17	30,45	15,51	128,08	150	25,90	9,81	199,28	11,76	49,10	248,38
64	12,60	73,65	105,00	34,17	30,72	14,98	128,28	150	25,90	9,81	199,49	11,35	49,10	248,59
65	12,60	73,65	105,00	34,17	30,97	14,44	128,47	150	25,90	9,81	199,59	10,95	49,10	248,69
66	12,60	73,65	105,00	34,17	31,22	13,90	128,66	150	25,90	9,81	199,60	10,53	49,10	248,70
67	12,60	73,65	105,00	34,17	31,46	13,35	128,84	150	25,90	9,81	199,51	10,12	49,10	248,61
68	12,60	73,65	105,00	34,17	31,69	12,80	129,01	150	25,90	9,81	199,33	9,70	49,10	248,43
69	12,60	73,65	105,00	34,17	31,90	12,25	129,18	150	25,90	9,81	199,05	9,28	49,10	248,15
70	12,60	73,65	105,00	34,17	32,11	11,69	129,34	150	25,90	9,81	198,69	8,86	49,10	247,79
71	12,60	73,65	105,00	34,17	32,31	11,13	129,49	150	25,90	9,81	198,23	8,43	49,10	247,33
72	12,60	73,65	105,00	34,17	32,50	10,56	129,63	150	25,90	9,81	197,70	8,00	49,10	246,80
73	12,60	73,65	105,00	34,17	32,68	9,99	129,77	150	25,90	9,81	197,07	7,57	49,10	246,17

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
74	12,60	73,65	105,00	34,17	32,85	9,42	129,90	150	25,90	9,81	196,37	7,14	49,10	245,47
75	12,60	73,65	105,00	34,17	33,01	8,84	130,02	150	25,90	9,81	195,60	6,70	49,10	244,70

Tabella 2 - identificazione delle gittate teoriche ed effettive

Nella tabella precedente, lungo la colonna Gittata effettiva, è indicata in rosso la gittata massima che l'elemento pala potrebbe raggiungere nel caso in cui si distaccasse completamente. I gradi in cui si determinerebbe il valore di gittata massima per le zone distinguibili come II° e I° quadrante di un piano cartesiano identificabili quindi alla sinistra ed alla destra della WTG possono essere quantificati rispettivamente a 66 gradi a destra e 132 gradi a sinistra andando a decrescere avvicinandosi sull'asse orizzontale del piano considerato.

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

- 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.

6 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 teorica a cui potrebbe essere possibile rinvenire l'intera ala o porzioni della stessa in caso di distacco è di **248,70 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, il risultato del calcolo della possibile gittata permette di poter affermare l'assenza di minacce per l'incolumità pubblica.

Palermo 10/07/2023

Ing. Girolamo Gorgone